А. Г. МОРОЗОВ

расчет электрических машин постоянного тока

А. Г. МОРОЗОВ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов неэлектротехнических
специальностей втузов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва 1972

6П2.1.081
М80
УДК 621.313.2

Морозов А. Г.

Расчет электрических машин постоянного тока. Учебн. пособие для неэлектротехн. специальностей втузов. М., «Высшая школа», 1972.

224 с. с илл.

В книге рассматриваются общие вопросы проектирования электрических машин постоянного тока, приводятся расчеты обмотки якоря, магнитной цепи, обмотки возбуждения, компенсационной обмотки, вентиляции и др.

3—3—10
101—72 **6П2.1.081**

Рецензенты:

Кафедра «Электрооборудование самолетов и автомобилей» Московского энергетического института

Кандидат технических наук **Галкина Г. В.**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические машины постоянного тока находят широкое применение в различных отраслях нашей промышленности. Несмотря на то, что выпуск их велик, намечается его дальнейшее увеличение.

Значительное распространение электродвигателей постоянного тока объясняется тем, что они обладают ценными свойствами: высокими пусковыми, тормозными и перегрузочными моментами, сравнительно высоким быстродействием, что существенно при реверсировании и торможении; допускают широкое и плавное регулирование скорости вращения.

Электродвигатели постоянного тока используют для регулируемых приводов, например, для приводов различных станков и механизмов. Мощности этих электродвигателей достигают сотен киловатт.

В связи с автоматизацией управления производственными процессами и механизмами растет применение маломощных двигателей постоянного тока мощностью от единиц до сотен ватт.

Генераторы постоянного тока общего применения в настоящее время применяются меньше, чем электродвигатели, поскольку значительное распространение получают ионные и полупроводниковые преобразователи.

Большое место электродвигатели и генераторы постоянного тока занимают в электрооборудовании летательных аппаратов. Генераторы применяют в качестве источников питания; максимальная мощность их достигает 30 *квт*. Электродвигатели используют для привода различных механизмов; мощность их имеет значительный диапазон — от долей до десятка киловатт. На самолетах, например, устанавливается более 200 электродвигателей постоянного тока.

Таким образом, электрические машины постоянного тока выполняются на мощности от единиц ватт до сотен киловатт и отвечают самым разнообразным требованиям.

В зависимости от назначения электрической машины, условий, в которых она работает, требований к ее электрическим характеристикам и конструктивному исполнению проектирование ее имеет свои особенности.

При проектировании, например, машины для летательного аппарата, важнее чем для наземных машин, уменьшение веса. Поэтому проектировщик должен допускать более высокие значения электрических, тепловых и механических нагрузок, что в свою очередь требует использования более высококачественных изоляционных, магнитных и конструкционных материалов, обеспечения интенсивного охлаждения.

В книге дается методика электрического, теплового и вентиляционного расчетов машин постоянного тока трех типов: наземных машин общего применения малой и средней мощности (от сотен ватт до 200 *квт*), машин для летательных аппаратов и машин малой мощности (от единиц ватта до нескольких сотен ватт), применяемых в устройствах автоматики и телемеханики, для привода бытовых механизмов. В соответствующих разделах приводятся необходимые рекомендации, как в зависимости от типа машины и требований к ней выбирать те или иные электромагнитные параметры, материалы, конструктивные величины. Однако при этом не ставится задача отразить все особенности расчета какого-то конкретного типа электрической машины постоянного тока. Это задача специализированных курсов.

Задача пособия — облегчить расчет электрической машины при курсовом проектировании.

В книге приводится значительный материал, необходимый для расчета в виде таблиц, графических зависимостей, справочных данных по магнитным материалам, проводам для обмоток, щеткам и т. п.

В книге принята Международная система единиц (СИ).

Автор выражает благодарность научному редактору канд. техн. наук Мастяеву Н. З. и рецензентам: сотрудникам кафедры «Электрооборудование самолетов и автомобилей» Московского энергетического института и канд. техн. наук Галкиной Г. В. за полезные советы и замечания.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При расчете электрических машин кроме общих теоретических сведений, необходимо знать устройство машин и их элементов, применяемые для изготовления материалы, а также конструкции современных машин и их расчетные данные.

Основные элементы электрических машин

На рис. 1.1 дан чертеж электродвигателя постоянного тока общего применения. Машины для летательных аппаратов и маломощные в принципе устроены так же.

Любая электрическая машина состоит из двух частей: неподвижной — статора (чаще всего внешняя часть) и вращающейся — ротора. Статор в машинах постоянного тока называют индуктором (источником потока возбуждения), а ротор — якорем (по названию главного элемента ротора).

Статор (индуктор) состоит из станины *6*; главных полюсов *12* с обмотками возбуждения *13*; добавочных полюсов *15* с обмотками возбуждения *14*.

Ротор (якорь) состоит из вала *11*, сердечника якоря *7* с обмоткой *16*, коллектора *3*, *5*.

Кроме того, машина имеет токосъемное устройство, внешние зажимы, подшипники, подшипниковые щиты, защитные устройства, вентилятор.

Станина 6 является корпусом машины и в то же время частью магнитной системы, проводящей потоки, которые создаются главными и добавочными полюсами машины. В большинстве случаев станины имеют цилиндрическую форму, изготавливаются из стали. Станины бывают сплошные или шихтованные.

Главные полюсы 12 состоят из сердечника полюсов и полюсного наконечника, которые штампуются заодно (в маломощных машинах заодно штампуют иногда и полюсные листы со станиной). Как правило, главные полюсы изготавливаются шихтованными из листовой стали толщиной 0,5 ÷ 2 *мм*; только в маломощных машинах бывают полюсы, выполненные целыми из литой стали. Листы полюса скрепляются заклепками или шпильками. Полюсным наконечникам придают различную форму в зависимости от условий работы и назначения машины. Чаще всего наконечники имеют симметричную форму. Но когда в машине половинное число до-

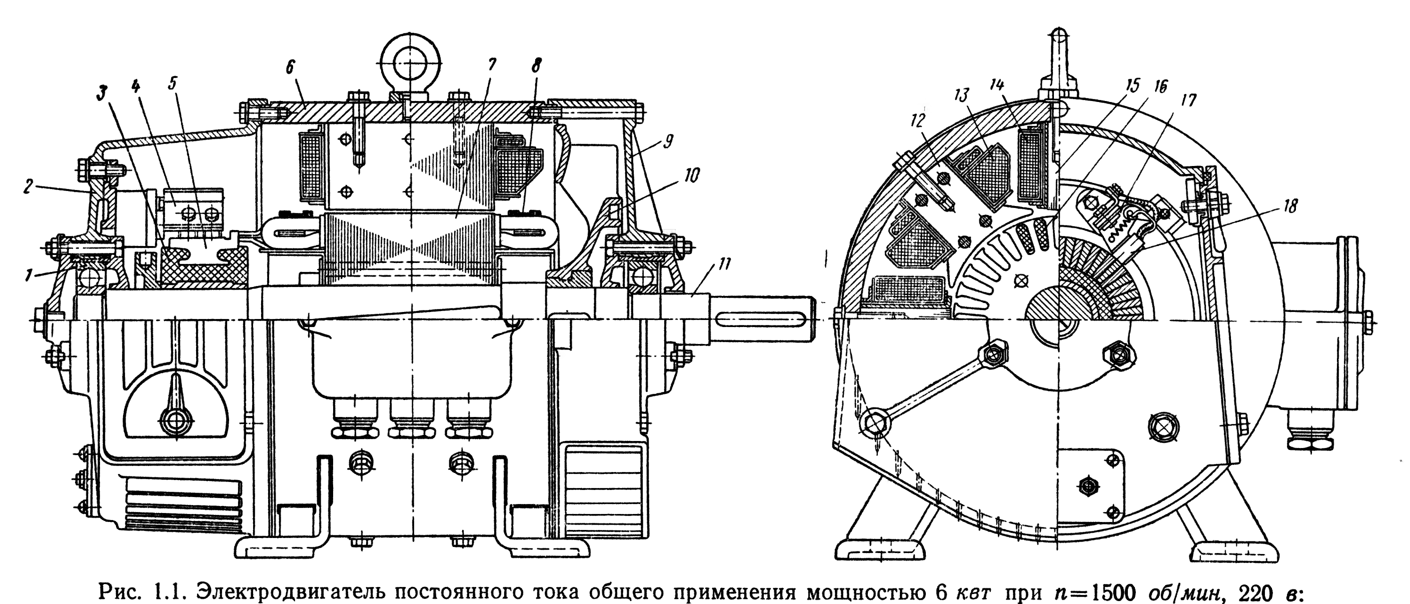


Рис. 1.1. Электродвигатель постоянного тока общего применения мощностью 6 *квт* при $n=1500$ *об/мин*, 220 *в*:

1 — шарикоподшипник; *2* — передний подшипниковый щит; *3* — крепление коллектора пластмассой; *4* — палец щеткодержателя; *5* — коллекторная пластина; *6* — станина; *7* — сердечник якоря; *8* — бандаж лобовых частей обмотки якоря; *9* — задний подшипниковый щит; *10* — вентилятор; *11* — вал; *12* — главный полюс; *13* — катушка возбуждения главного полюса; *14* — катушка возбуждения добавочного полюса; *15* — добавочный полюс; *16* — паз с обмоткой якоря; *17* — щеткодержатель; *18* — щетка

бавочных полюсов, форма полюсного наконечника несимметричная. В машинах с компенсационной обмоткой в полюсном наконечнике для нее имеются пазы. Главные полюсы крепятся к станине с помощью винтов. В стыке между полюсом и станиной обычно прокладывается несколько прокладок для регулировки воздушного зазора между полюсом и сердечником якоря.

Добавочные полюсы 15 предназначаются для улучшения коммутации. Они состоят из сердечника и наконечника, которые изготовляют заодно цельными или шихтованными из стальных листов (маломощные машины не имеют добавочных полюсов). Крепление добавочных полюсов к станине осуществляется так же, как и главных.

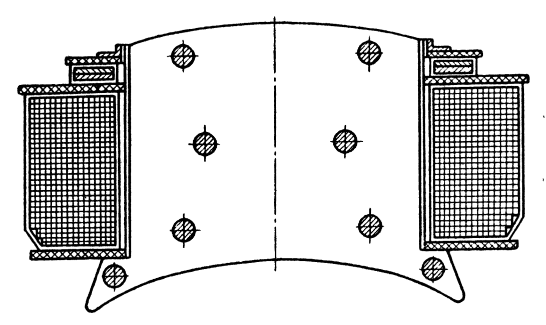


Рис. 1.2. Катушка возбуждения главного полюса

Число добавочных полюсов в большинстве случаев равно числу главных полюсов, а иногда половине главных.

Обмотки возбуждения главных *13* и добавочных *14* полюсов представляют собой катушки из изолированных или неизолированных проводов (рис. 1.2), которые наматываются отдельно от полюсов.

Катушки из изолированных проводов выполняют с наружной изоляцией из хлопчатобумажной ленты или стеклоленты и без наружной изоляции, что обеспечивает лучшую теплоотдачу, но хуже защищает обмотки от повреждений. Иногда катушки получают путем намотки изолированных проводов непосредственно на полюс, который предварительно изолируется.

Катушки из неизолированных проводов прямоугольного сечения выполняют многослойными (намоткой плашмя) или однослойными (намоткой на ребро).

Для добавочных полюсов чаще применяют неизолированный провод прямоугольного сечения, при изготовлении катушек провод сгибается на высокое ребро. Между витками неизолированных проводов укладывают прокладки из прессшпана, асбестовой бумаги или миканита толщиной $0{,}3 \div 0{,}5$ *мм*. Изготовленные катушки закрепляют на полюсах, которые до этого изолируют, а со стороны станины и полюсного наконечника помещают изоляционные шайбы из гетинакса и металлические шайбы.

Сечение катушки часто бывает трапециевидной формы, расширяющейся в сторону ярма, что обеспечивает лучшее использование имеющегося пространства (см. *13* на рис. 1.1).

Вал 11 имеет ступенчатую форму для раздельной посадки на него сердечника якоря, коллектора, вентилятора и др.

В генераторах и двигателях для летательных аппаратов с не-

равномерным моментом нагрузки применяют двойные валы: полый внешний вал, внутрь которого помещается гибкий вал. Внешний вал устанавливается на подшипниках и воспринимает вес якоря. Гибкий вал соединяется с приводом с помощью шлицев, имеющихся на свободном его конце. Такая конструкция позволяет снизить колебания скорости вала, возникающие в результате пульсации вращающего момента приводного двигателя генератора или из-за неравномерности момента сопротивления некоторых механизмов, так как эти пульсации почти полностью ликвидируются с помощью гибкого вала.

Валы машин общего применения изготовляют из сталей марок 35, 40 или 5; валы генераторов и некоторых двигателей для летательных аппаратов — из прокатной стали 30ХГСА.

Сердечник якоря 7 выполняют из штампованных, изолированных друг от друга пластин, изготовленных из электротехнической стали толщиной 0,2—0,5 *мм*. Пластины на внешней стороне имеют отверстия, которые в собранном сердечнике якоря (пакете) образуют пазы *16*. В спинке сердечника якоря (часть пластины между отверстием для вала и основанием пазов) машин с аксиальной системой вентиляции имеются выштампованные отверстия, образующие в собранном пакете аксиальные вентиляционные каналы.

В машинах общего применения с радиальной системой вентиляции пластины собирают в несколько пакетов небольшой толщины, крайние листы которых делают толщиной 1,0 *мм* с приваренными распорками. Распорки удерживают отдельные пакеты на расстоянии примерно 1,0 *см* и таким образом образуют радиальные вентиляционные каналы.

В машинах для летательных аппаратов радиальные вентиляционные каналы выполнить нельзя, так как общая длина пакета имеет небольшую величину (менее 13 *см*). Маломощные машины не имеют ни аксиальных, ни радиальных каналов.

Машины небольшой мощности обычно имеют полузакрытые пазы и многовитковую всыпную обмотку из круглых изолированных проводов. Такие обмотки изготавливают в виде мягких катушек на намоточных станках. Катушки не имеют наружной изоляции, а изоляцией от корпуса служит изоляционный материал, которым выстилается паз. Катушки состоят из нескольких секций, начала и концы которых подсоединяются к коллекторным пластинам. Такую обмотку (катушку) закладывают в пазы сердечника якоря через прорези пазов, осаживают в пазах, уплотняют и закрепляют плоскими клиньями из дерева, гетинакса, текстолита или стеклотекстолита. В маломощных машинах обмотку иногда выполняют непосредственно на якоре, пазы которого предварительно изолируются.

Обмотки машин с прямоугольными пазами изготавливают из прямоугольной меди. Катушки такой обмотки изолируют до укладки в пазы.

В машинах малой и средней мощности диаметром до 40 *см* с открытыми пазами обмотка крепится бандажом из стальной проволоки, в более крупных машинах — клиньями.

При укладке в паз катушек двухслойной обмотки одну боковую сторону катушки располагают внизу одного паза, другую — вверху другого паза. Стороны катушки, лежащие в пазу, называют активными, выступающие из пазов части обмотки якоря — лобовыми, их крепят бандажом из стальной проволоки. Под бандажи на активной и лобовой частях обмоток укладывают изоляцию.

Коллектор имеет цилиндрическую форму и состоит из медных пластин, изолированных друг от друга прокладками из миканита. Крепление пластин осуществляется нажимными конусными фланцами и кольцевой гайкой. В настоящее время широко применяют

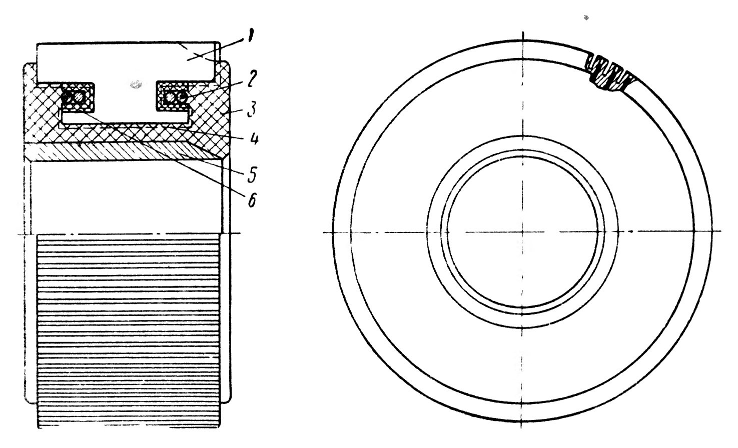


Рис. 1.3. Цилиндрический коллектор с креплением пластин пластмассой:

1 — пластина коллектора; *2* — кольцо; *3* — пластмасса; *4* — изолирующий миканит; *5* — втулка; *6* — изоляционная манжета

крепление пластин пластмассой. Коллекторы вентилируемых машин изготавливаются с вентиляционными каналами.

На рис. 1.3 показана одна из конструкций коллектора двигателя общего применения. Соединение обмотки якоря из круглого провода с коллектором в машинах небольшой мощности осуществляется непосредственно с помощью шлицев, имеющихся в каждой коллекторной пластине. Соединение обмотки якоря из провода прямоугольного сечения с коллектором производят с помощью особых медных пластин, называемых петушками.

Токосъемное устройство (см. рис. 1.1) состоит из щеток *18*, щеткодержателей *17*, пальцев (или бракетов) *4* и траверсы.

Щетки имеют прямоугольную форму сечения. Основание щеток устанавливают по образующим цилиндрической поверхности коллектора. Эту часть поверхности коллектора называют коммутационной зоной. Обычно число коммутационных зон равно числу полюсов машины. В коммутационной зоне, как правило, устанавливают не менее двух щеток, с тем чтобы повысить надежность щеточного контакта. Число щеток определяют, исходя из величи-

ны тока и допустимой для данной марки щетки плотности тока под щеткой.

Щеткодержатели служат для того, чтобы удерживать щетки в фиксированном положении. Конструктивное исполнение их весьма разнообразно. Наиболее распространены коробчатые щеткодержатели. Щетки в них устанавливаются в обойме в виде коробки прямоугольной или цилиндрической формы и прижимаются к поверхности коллектора цилиндрической или ленточной пружиной. В маломощных машинах применяют коробчатые цилиндрические щеткодержатели.

Щеткодержатели одной зоны укрепляют на щеточных пальцах круглого или квадратного сечения или на бракетах (крупные машины). К пальцам подсоединяются щетки.

Пальцы одной коммутационной зоны соединяют электрически друг с другом изолированным проводом или прямоугольными шинами. Пальцы укрепляют на траверсах, надежно изолируя, чтобы избежать соединения пальцев разных зон. Траверсы крепятся к подшипниковым щитам или к станине. Пальцы одной полярности объединяют, в результате чего образуются два собирательных кольца, каждое из которых с помощью гибких кабелей присоединяют к внешним зажимам машины, укрепляемым на доске зажимов станины. Внешние зажимы закрывают предохранительной крышкой (колпаком).

Вал машины, как указывалось, опирается на *подшипники 1*. В современных машинах применяют подшипники качения (при мощностях менее 400 *квт*). Подшипники крепятся в *щитах 2, 9* машины, которые привертываются болтами к станине.

Защита машин от внешних воздействий и способы охлаждения

С точки зрения защиты от внешних воздействий различают следующие основные формы исполнения машин постоянного тока: открытые, защищенные, брызгозащищенные, водозащищенные, закрытые, герметичные, газонаполненные, взрывобезопасные.

Существуют следующие способы охлаждений:

а) естественное охлаждение — засос воздуха из окружающей среды производится только за счет вентилирующего действия вращающихся частей машины;

б) самовентиляция — охлаждение осуществляется встроенным вентилятором (на валу машины) или специальными вентиляционными крыльями, составляющими одно целое с якорем машины (или и тем и другим).

Различают *внутреннюю* и *наружную* самовентиляцию: в первом случае вентилятор прогоняет холодный воздух внешней среды через машину, во втором — вдоль ее наружной поверхности. Внутренняя самовентиляция бывает проточной и замкнутой. При проточной самовентиляции в машину все время поступает свежий воздух внешней среды.

К закрытым машинам свежий воздух подводится по специальной трубе или по каналу, а нагретый в машине воздух выпускается в помещение, где установлена машина. В закрытых машинах с замкнутой самовентиляцией охлаждение производится все время одним и тем же объемом воздуха, который циркулирует через внутренние части машины и, как правило, через воздухоохладитель (воздушный или водяной);

в) независимое (принудительное или с продувом) — охлаждение производится путем продува воздуха или другой охлаждающей среды, подаваемой внутрь машины с помощью труб или иных приспособлений от вентилятора, работающего независимо от машины или от насоса. В закрытых машинах независимая вентиляция также бывает проточной и замкнутой. В замкнутой системе вентиляции в закрытых машинах с $D_я > 16$ *см* используют воздухоохладители.

В закрытых машинах с наружной самовентиляцией или с независимой вентиляцией дополнительно внутрь машины помещают вентилятор, называемый мешалкой, который перемешивает воздух внутри машины и выравнивает температуру.

Подробнее о типах и конструктивных исполнениях различных элементов машин сообщается далее в соответствующих разделах.

Конструкции электрических машин

Машины общего применения

Двигатели и генераторы общего применения обычно проектируют в виде серий.

Серия представляет собой ряд машин, основные параметры которых — мощность и геометрические размеры — стройно нарастают по определенному закону. Машины данной серии имеют одинаковое назначение, конструктивное исполнение, технологию производства.

В настоящее время широко распространены так называемые единые серии, машины которых, изготовляемые на разных заводах, имеют одинаковые технические данные и размеры. Основные детали и узлы этих машин взаимозаменяемы. Серийно выпускаются также многие машины для летательных аппаратов и маломощные.

Единые серии машин общего применения почти полностью заменили в производстве старые машины. Основной из них является единая серия П, номенклатура машин которой подразделяется на 3 группы:

1) машины мощностью $0{,}3 \div 200$ *квт* (1—11 габариты);
2) машины мощностью $200 \div 1400$ *квт* (12—17 габариты);
3) машины мощностью сверх 1400 *квт* (18—26 габариты).

В обозначение электрической машины входят серия, номер габарита и длина сердечника якоря.

Габарит машины соответствует определенному внешнему диаметру якоря (в табл. 1.1 приведены данные машин мощностью до

200 *квт*), а так как для каждого габарита имеются две длины сердечника якоря, машины обозначают двумя цифрами. Например П32 означает: машина единой серии П, 3-го габарита, с сердечником 2-й длины.

Таблица 1.1

№ габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$D_я$, *см*	8,3	10,6	12,0	13,8	16,2	19,5	21,0	24,5	29,4	32,7	36,8

Рассмотрим электрические машины общего применения единой серии П мощностью 0,3 ÷ 200 *квт*, 1—11-го габаритов.

Таблица 1.2

Мощности электродвигателей общего применения (защищенное исполнение)

Типоразмер	110 *в*					220 *в*					440 *в*		
	Мощность, *квт* при скорости вращения, *об/мин*												
	600	750	1000	1500	3000	600	750	1000	1500	3000	750	1000	1500
										0,7			
11	—	—	0,13	0,30	0,7	—	—	0,13	0,3	1,0	—	—	—
12	—	—	0,20	0,45	1,0	—	—	0,2	0,45	1,5	—	—	—
21	—	0,2	0,30	0,70	1,5	—	0,2	0,3	0,7	2,2	—	—	—
22	—	0,3	0,45	1,00	2,2	—	0,3	0,45	1,0	3,2	—	—	—
31	—	0,45	0,70	1,50	3,2	—	0,45	0,7	1,5	4,5	—	—	—
32	—	0,7	1,00	2,20	4,5	—	0,7	1,0	2,2	6,0	—	—	—
41	—	1,0	1,50	3,20	6,0	—	1,0	1,5	3,2	8,0	—	—	—
42	—	1,5	2,20	4,50	8,0	—	1,5	2,2	4,5	11,0	—	—	—
51	—	2,2	3,20	6,00	—	—	2,2	3,2	6,0	14,0	—	—	—
52	—	3,2	4,50	8,00	—	—	3,2	4,5	8,0	19,0	—	—	—
61	—	4,5	6,0	11,00	—	—	4,5	6,0	11,0	25,0	—	—	—
62	—	6,0	8,00	14,00	—	—	6,0	8,0	14,0	32,0	—	—	—
71	—	8,0	11,00	19,00	—	—	8,0	11,0	19,0	42,0	—	—	—
72	—	11,0	14,00	25,00	—	—	11,0	14,0	25,0	—	—	—	—
81	—	14,0	19,00	32,00	—	—	14,0	19,0	32,0	—	—	19	32
82	—	19,0	25,00	—	—	—	19,0	25,0	42,0	—	—	25	42
91	19	25,0	32,00	—	—	19	25,0	32,0	55,0	—	22	32	55
92	25	32,0	—	—	—	25	32,0	42,0	75,0	—	32	42	75
101	32	42,0	55,00	—	—	32	42,0	55,0	100,0	—	42	55	100
102	42	55,0	—	—	—	42	55,0	75,0	125,0	—	55	75	125
111	55	—	—	—	—	55	75,0	100,0	160,0	—	75	95	160
112	—	—	—	—	—	70	85,0	125,0	200,0	—	85	125	180

Основное исполнение электродвигателей единой серии П 1—11-го габаритов — защищенное с самовентиляцией или с независимой вентиляцией на номинальные напряжения 110, 220 и 440 *в*. Электродвигатели имеют смешанное возбуждение, скорости вращения $n = 600$, 700, 1000, 1500 и 3000 *об/мин*.

Генераторы этой серии изготавливают защищенными, с самовентиляцией на номинальное напряжение 115, 230 и 460 *в*. Генераторы имеют смешанное возбуждение, $n = 1450$ и 2850 *об/мин*.

Мощности электродвигателей серии П (сводная шкала) приведены в табл. 1.2, генераторов — в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Мощности генераторов общего применения со смешанным компаундным возбуждением (защищенное исполнение)

Типоразмер	115 *в*			230 *в*			460 *в*	
	Мощность, *квт* при скорости вращения, *об/мин*							
	980	1450	2850	980	1450	2850	980	1450
21	—	0,37	1,25	—	0,37	1,25	—	—
22	—	0,6	1,6	—	0,6	1,6	—	—
31	—	1,0	2,6	—	1,0	2,6	—	—
32	—	1,5	3,8	—	1,5	3,8	—	—
41	—	2,7	6,2	—	2,7	6,2	—	—
42	—	3,2	7,2	—	3,2	7,2	—	—
51	—	5,0	11,0	—	5,0	11,0	—	—
52	—	6,5	14,0	—	6,5	14,0	—	—
61	—	9,0	—	—	9,0	18,0	—	—
62	—	11,5	—	—	11,5	25,0	—	—
71	—	16,0	—	—	16,0	—	—	—
72	—	21	—	—	21,0	—	—	—
81	19	27,0	—	19	27,0	—	—	27
82	25	35,0	—	25	35,0	—	25	35
91	32	50,0	—	32	50,0	—	32	50
92	42	—	—	42	70,0	—	42	75
101	55	85	—	55	90,0	—	55	90
102	70	—	—	70	110,0	—	65	110
111	90	—	—	90	150,0	—	90	145
112	—	—	—	115	190,0	—	110	170

Машины 1—3-го габаритов изготавливаются с изоляцией класса A, 4—6-го габаритов — класса B, 7—11-го габаритов — класса F. Все машины выполняют с добавочными полюсами.

Машины 1—3-го габаритов имеют два главных и один добавочный полюс, 4—11-го габаритов — четыре главных и четыре добавочных полюса.

Станина — цилиндрическая, стальная для машин 1—6-го габаритов изготавливается из труб, для машин 7—11-го габаритов — из толстолистовой стали.

Якорь машин 1—6-го габаритов имеет полузакрытые пазы, 7—11-го габаритов — открытые.

Вал якоря машин 1—6-го габаритов изготовляют из стали 35 или 40, 7—11-го габаритов — из стали марки ст. 5.

Сердечник якоря набирается непосредственно на вал и выполняется из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*.

Обмотку якоря машин 1—6-го габаритов выполняют всыпной, из круглого провода. Крепление обмотки в пазах осуществляется текстолитовыми клиньями, а лобовой части — бандажами из стальной проволоки. Обмотку якоря машин 7—11-го габаритов выполняют из прямоугольного провода в виде отдельных изолированных катушек. Крепление обмотки в пазах, а также лобовых частей осуществляется бандажами из стальной проволоки. Обмотки якоря пропитываются лаком и покрываются эмалью.

Параллельную обмотку возбуждения выполняют из круглого изолированного провода; в машинах 1—6-го габаритов — сплошной, в машинах 7—11-го габаритов — секционированной по высоте полюса, между ее половинами располагается стабилизирующая последовательная обмотка.

Обмотку добавочных полюсов и последовательную обмотку возбуждения выполняют из изолированных проводов при небольших сечениях провода или из голой меди прямоугольного провода, гнутого на ребро, при больших сечениях провода.

Коллектор машин 1—6-го габаритов изготовляют с креплением деталей пластмассой. Для повышения механической прочности в машинах 4—6-го габаритов пластмасса армирована стальными кольцами. Коллектор машин 7—11-го габаритов выполняют арочного типа. Пластины его крепятся между нажимным конусом втулки и конусом нажимного фланца и изолируются от них миканитовыми манжетами.

Соединение обмотки якоря с коллектором в машинах 1—6-го габаритов осуществляется непосредственно, в машинах 7—11-го габаритов к коллекторным пластинам припаиваются петушки.

Щеткодержатели машин 1—6-го габаритов штампуют из листовой латуни и устанавливают на текстолитовых пальцах, 7—11-го габаритов изготавливают из латуни литьем под давлением и устанавливают на пальцах, штампованных из листовой стали.

Щетки в зависимости от назначения и условий работы используют различных марок: ЭГ2, ЭГ4, ЭГ7.

Размеры щеток, *мм*

Габарит 1-й	8×10×25
» 2—6-й	10×12,5×32
» 7-й	12,5×25×32
» 8, 9-й	16×25×32 или 2 (8×25) — сдвоенные щетки
» 10-й	20×32×40 или 2 (10×32) — сдвоенные щетки
» 11-й	25×32×40 или 2 (12,5×32) — сдвоенные щетки

Подшипниковые узлы имеют бескапсульное исполнение с подшипниками качения. В машинах 1—6-го габаритов на обеих сторонах якоря устанавливают шариковые подшипники; в машинах 7—11-го габаритов на стороне привода — роликовые, а на противоположной стороне — шариковые подшипники.

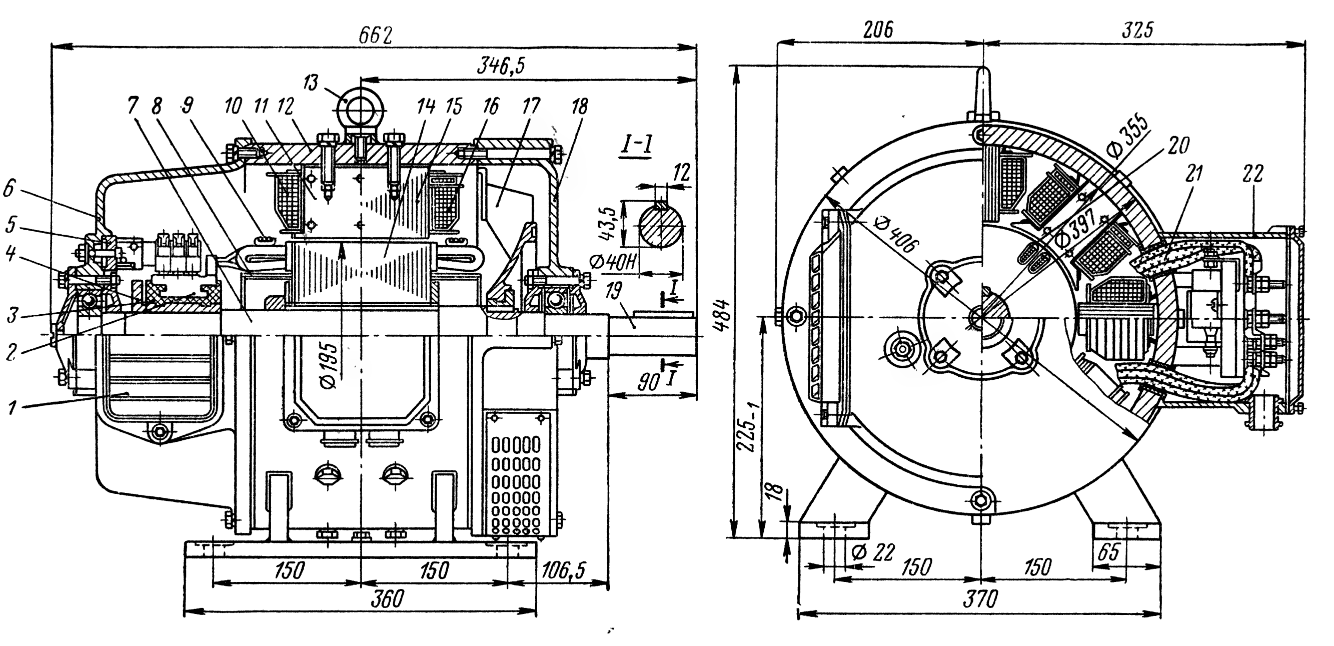


Рис. 1.4. Электродвигатель постоянного тока мощностью 14 *квт* при $n=1500$ *об/мин*, 220 *в*:

1 — люковая крышка; *2* — коллекторная пластина; *3* — крепление коллектора пластмассой; *4* — кольцо для размещения балансировочных грузов; *5* — траверса; *6* — передний подшипниковый щит; *7* — вал; *8* — обмоткодержатель; *9* — бандаж лобовых частей обмотки якоря; *10* — катушка добавочного полюса; *11* — добавочный полюс; *12* — станина; *13* — ушко транспортное; *14* — сердечник якоря; *15* — главный полюс; *16* — катушка возбуждения главного полюса; *17* — вентилятор; *18* — задний подшипниковый щит; *19* — свободный конец вала; *20* — паз якоря с обмоткой; *21* — отверстие для ввода кабеля; *22* — коробка выводного устройства

Машины защищенного исполнения делают с аксиальной вытяжной самовентиляцией. В машинах 1—11-го габаритов охлаждающий воздух засасывается через жалюзи щитов со стороны коллектора, омывает коллектор, проходит между катушками полюсов и выбрасывается через решетку заднего подшипникового щита. В машинах 7—11-го габаритов имеется еще параллельный поток воздуха, поступающий через аксиальные каналы коллектора и якоря.

В машинах закрытого исполнения для лучшего охлаждения воздух перемешивается небольшими лопастями, расположенными на валу. Перемешиванию воздуха содействует также вентилирующее действие якоря при его вращении.

В машинах закрытого исполнения с наружным обдувом на валу за подшипниковым щитом со стороны привода располагают вентилятор, который обдувает подшипниковый щит и станину.

В машинах закрытого исполнения с воздухоохладителем нагретый внутри машины воздух охлаждается, проходя через каналы воздухоохладителя. Холодный воздух из воздухоохладителя подается вентилятором, расположенным на валу за подшипниковым щитом.

При независимой вентиляции на валу якоря вместо вентилятора устанавливают балансировочное кольцо.

Пристроенные электровентиляторы устанавливают на машинах 4—6-го габаритов со стороны привода, а на машинах 7—11-го — со стороны коллектора.

На рис. 1.4 дан чертеж электродвигателя мощностью 14 *квт*, 220 *в* при $n = 1500$ *об/мин*. В приложении 2 даны основные расчетные данные некоторых электродвигателей единой серии П.

Машины для летательных аппаратов

На рис. 1.5 дан чертеж электродвигателя для летательных аппаратов МП-2500. Исполнение электродвигателя защищенное, с самовентиляцией (на валу имеется вентилятор центробежного типа), режим работы длительный, мощность 2,5 *квт* при $n = 7200$ *об/мин*. Возбуждение электродвигателя параллельное, для запуска имеется пусковая обмотка.

Станина — цилиндрическая из стали марки ст. 10; двигатель имеет четыре главных полюса, добавочных полюсов нет. Главные полюсы изготавливают шихтованными из листовой стали толщиной 0,35 *мм*. Изоляцией между листами служит поверхностный слой окиси. Листы полюса между собой скрепляются заклепками. К станине полюсы прикрепляются винтами, для чего в сердечнике полюса предусмотрены отверстия.

Якорь имеет полузакрытые пазы.

Чертеж собранного якоря с обмоткой электродвигателя МП-2500 показан на рис. 1.6.

Вал якоря выполняется из стали 45, для посадки сердечника якоря он имеет прямую накатку.

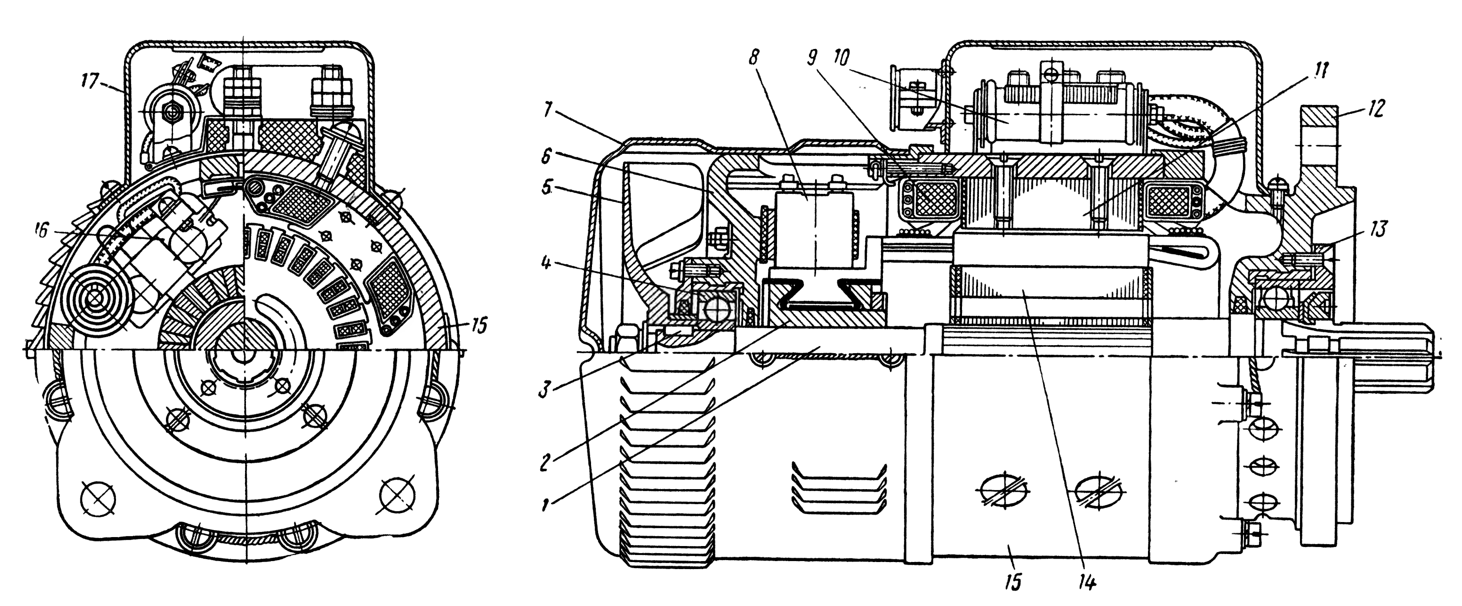


Рис. 1.5. Электродвигатель для летательных аппаратов МП-2500:

1 — вал; *2* — коллектор; *3* — шпонка; *4* — шарикоподшипник; *5* — вентилятор; *6* — щит со стороны коллектора; *7* — крышка; *8* — щетка; *9* — обмотка возбуждения главного полюса; *10* — регулировочное сопротивление; *11* — главный полюс; *12* — щит со стороны привода; *13* — фланец; *14* — сердечник якоря; *15* — станина; *16* — щеткодержатель; *17* — крышка выводного устройства

Сердечник якоря выполняют из штампованных изолированных друг от друга листов электротехнической стали Э44 толщиной 0,35 *мм*. Листы собираются в пакет и склеиваются. В сердечнике предусмотрены отверстия для аксиальных каналов.

Обмотка якоря — волновая стержневая, из прямоугольного медного провода ПЭВ-2; крепление обмотки в пазах осуществляется текстолитовыми клиньями, лобовые части крепятся проволочным бандажом.

Обмотку возбуждения главного полюса изготавливают из круглого провода ПЭЛ-1, пусковую — из провода ПШД. Она выполня-

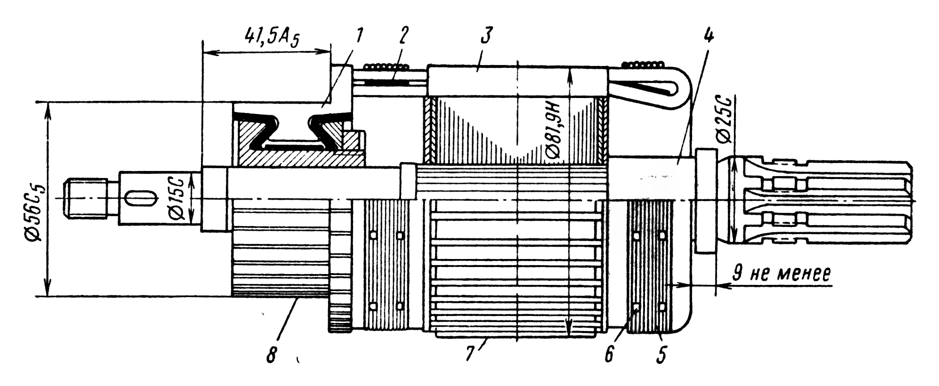


Рис. 1.6. Якорь электродвигателя для летательных аппаратов мощностью 2,5 *квт* при $n=7200$ *об/мин*:

1 — пластина коллектора; *2* — изоляционная прокладка между слоями обмотки; *3* — обмотка якоря; *4* — вал; *5* — проволочный бандаж; *6* — заделка бандажа; *7* — сердечник якоря; *8* — коллектор

ется в виде катушки, которая с внешней стороны изолируется одним слоем лакошелка толщиной 0,06 *мм* в полуперекрышку и одним слоем изоляционной ленты толщиной 0,18 *мм* и шириной 16 *мм* в полуперекрышку.

Коллектор — цилиндрический, крепление пластин типа ласточкина хвоста конусной нажимной шайбой.

Щеткодержатель — радиальный. Нажатие на щетку осуществляется непосредственно ленточной спиральной пружиной, щетки применяют МГС8.

Подшипники качения — открытые, радиальные, однорядные.

На рис. 1.7 дан чертеж серийно выпускаемого генератора для летательных аппаратов ГСР-9000. Мощность генератора 9 *квт*, напряжение 28,5 *в*, $n=4000—9000$ *об/мин*. Исполнение генератора защищенное, возбуждение параллельное.

Станина — цилиндрическая из стали ЭА.

Генератор имеет шесть главных и три добавочных полюса. Главные полюсы изготовляют шихтованными из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 *мм*. Сердечник главного полюса штампуют заодно с наконечником несимметричной формы. Добавочные полюсы изготовляют из отожженной стали армко, сердеч-

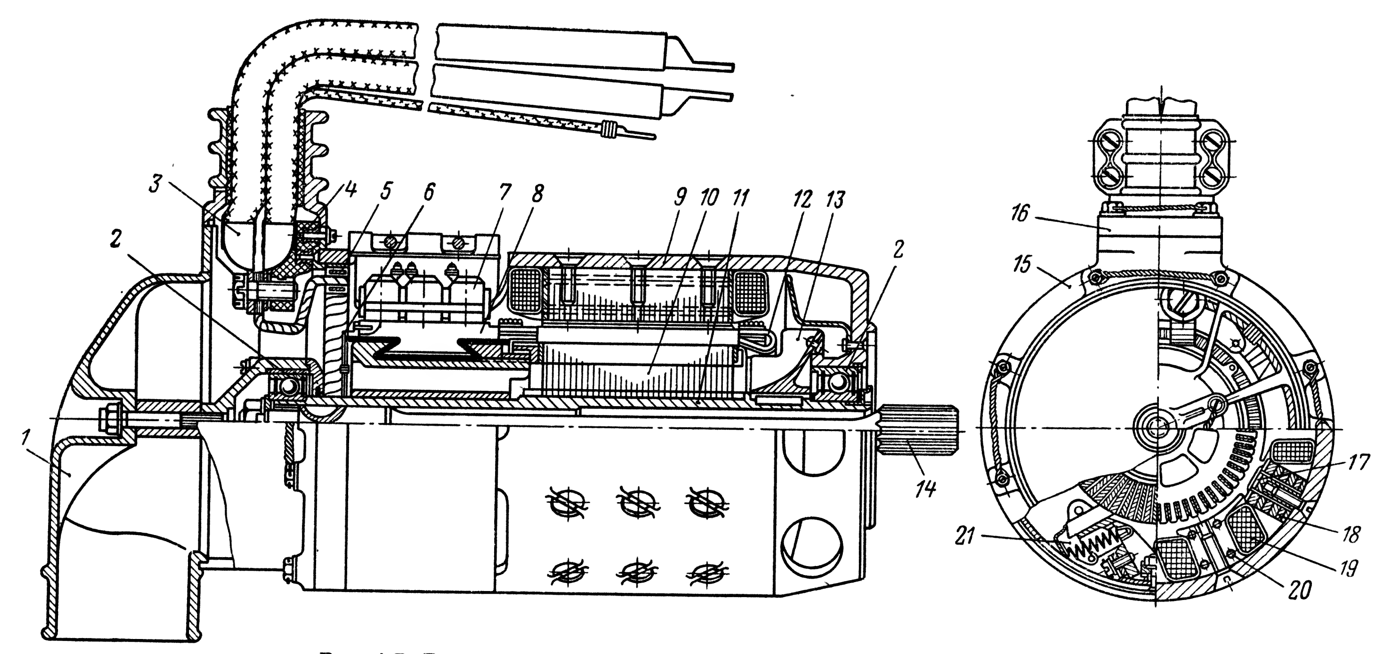


Рис. 1.7. Генератор для летательных аппаратов мощностью 9 *квт*:

1 — колпак; *2* — подшипник; *3* — выводной провод; *4* — панель выводов; *5* — межщеточное соединение; *6* — эквипотенциальные соединения; *7* — щетка; *8* — коллектор; *9* — станина; *10* — сердечник якоря; *11* — полый вал; *12* — обмотка якоря; *13* — вентилятор; *14* — гибкий валик; *15* — щит; *16* — ниппель; *17* — добавочный полюс; *18* — обмотка возбуждения добавочного полюса; *19* — обмотка возбуждения главного полюса; *20* — главный полюс; *21* — щеткодержатель

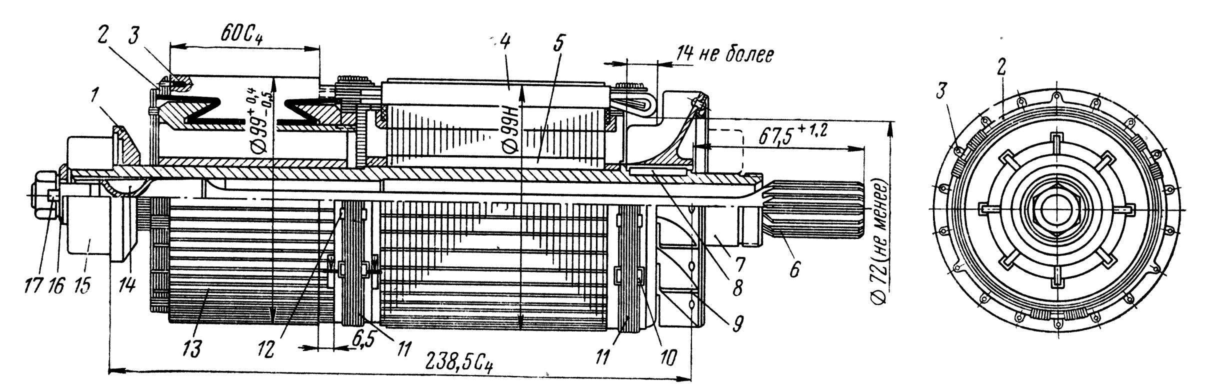


Рис. 1.8. Якорь генератора для летательных аппаратов мощностью 9 *квт*:

1 — фланец; *2* — уравнительные соединения; *3* — крепление уравнительных колец к коллекторной пластине; *4* — обмотка якоря; *5* — сердечник якоря; *6* — гибкий вал; *7* — пустотелый вал; *8* — шпонка; *9* — вентилятор; *10* — заделка концов бандажа; *11* — проволочный бандаж; *12* — скоба бандажа; *13* — коллектор; *14* — шпонка; *15* — шарикоподшипник; *16* — шайба; *17* — стопорная шайба

ник и наконечник добавочного полюса выполняют заодно. Сердечник крепится к станине винтами, для чего в нем высверливают отверстия под винты.

Якорь (рис. 1.8) имеет полузакрытые прямоугольные пазы.

Вал якоря состоит из внешнего полого вала и расположенного внутри него гибкого вала из прокатной стали 30ХГСА. Для посадки сердечника якоря и втулки коллектора внешний вал имеет накатку.

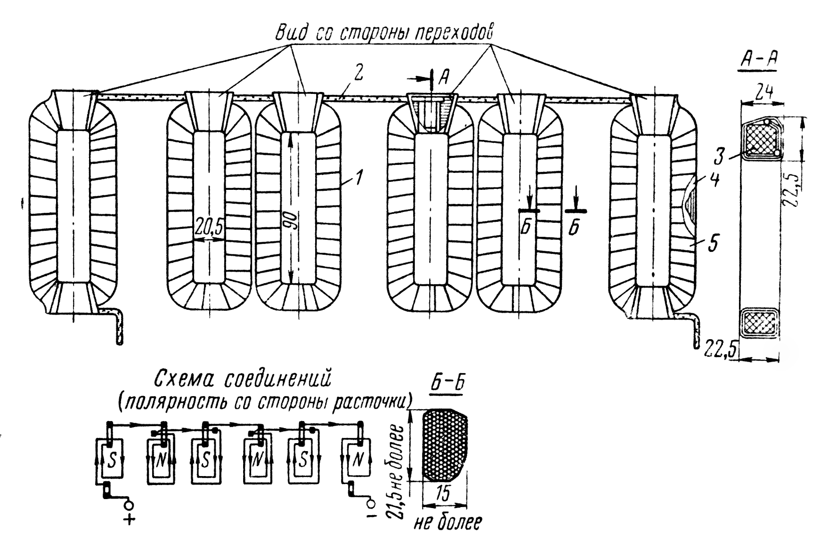


Рис. 1.9. Обмотка возбуждения главных полюсов генератора для летательных аппаратов мощностью 9 *квт*:

1 — катушка возбуждения; 2 — выводной провод; 3 — обмотка возбуждения; 4 — изоляция катушки (лакошелком); 5 — изоляция катушки (изоляционной лентой)

Сердечник якоря выполняют шихтованным из изолированных друг от друга листов электротехнической стали Э44 толщиной 0,35 *мм*. В собранном сердечнике имеются отверстия для аксиальных вентиляционных каналов. С торцов пакета якоря прокладываются изоляционные листы из стеклотекстолита, которые прижимаются к пакету якоря нажимными шайбами из алюминиевого сплава, предохраняющими пакет от распушения. Сердечник якоря запрессовывается на накатанную поверхность полого вала.

Обмотка якоря — петлевая стержневая, из прямоугольного провода ПШД или ПЭТКСОТ. Крепление обмотки в пазах осуществляют клиньями из электрокартона или стеклотекстолита, лобовые части крепят проволочными бандажами. Обмотка имеет уравнительные соединения, число их с целью уменьшения веса и размеров машины неполное. Уравнительные соединения расположены со стороны коллектора и выполнены в виде шести медных замкнутых

колец (пластин) к каждому из которых припаиваются по три коллекторных пластины.

Обмотка возбуждения главных полюсов (рис. 1.9) выполнена из круглого провода ПЭВ-2 диаметром 1,4 *мм*. Ее изготовляют в виде гибкой катушки, которая изолируется одним слоем лакошелка толщиной 0,06 *мм* в полуперекрышку и одним слоем изоляционной ленты толщиной 0,18 *мм* и шириной 16 *мм* в полуперекрышку.

Обмотка добавочных полюсов выполнена в виде катушек из неизолированного провода прямоугольного сечения, согнутого на вы-

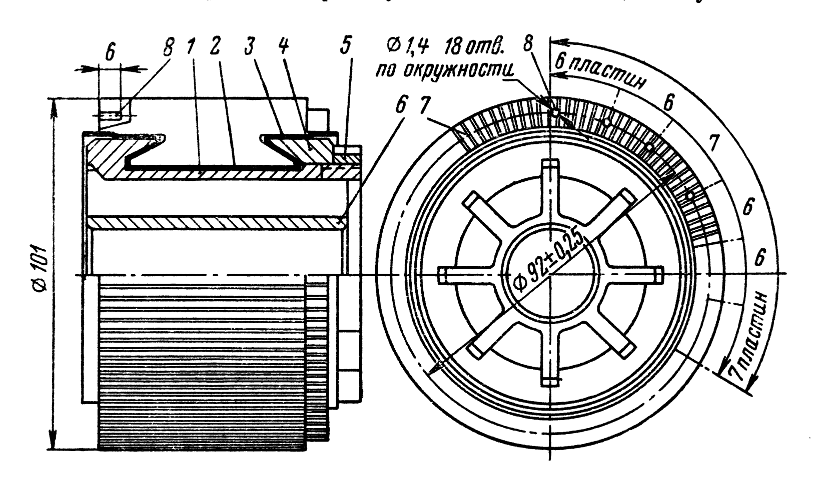


Рис. 1.10. Коллектор генератора мощностью 9 *квт* для летательных аппаратов:

1 — втулка; *2* — изоляционный цилиндр; *3* — миканитовый конус; *4* — нажимная шайба; *5* — гайка; *6* — патрубок; *7* — пластина; *8* — отверстие для уравнительных шин

сокое ребро. Витки катушек изолируют лакошелком толщиной 0,06 *мм*, между витками прокладывают полоски из электрокартона толщиной 0,1 *мм*. Крайние витки катушки изолируют одним слоем ленты в полуперекрышку. Катушки пропитывают маслянокрезольным лаком, что повышает их влагостойкость. Чтобы уменьшить поток рассеяния добавочных полюсов, катушку приближают к поверхности якоря.

Коллектор — цилиндрический (см. рис. 1.10). Пластины коллектора собирают на стальную втулку и закрепляют нажимной шайбой, изолированной от пластин манжетами из миканита. Стальную втулку насаживают на ребристый дюралюминиевый патрубок, между втулкой и патрубком образуются каналы для прохождения воздуха.

Щеткодержатели — реактивные (наклонные); обойма щеткодержателя — сложной формы; пружина — цилиндрическая из стальной проволоки, давление ее на щетку передается через рычаг. Комплект щеток для одного полюса состоит из 3 щеток.

Охлаждение осуществляется продувом потока встречного за-

бортного воздуха, попадающего внутрь машины через патрубок генератора. Нагретый воздух выходит через окна в корпусе.

Подшипники качения закрытые. С каждой стороны подшипника имеются по две легкосъемные стальные защитные шайбы, между которыми проложены для уплотнения резиновые шайбы. Защитные шайбы могут быть сняты для смазки. Внутренние кольца подшипников насаживаются на вал плотно; внешние кольца, вставляемые в подшипниковые щиты, подвижны.

Маломощные машины

Маломощные электрические машины чаще всего применяют в качестве электродвигателей, генераторы менее распространены. Наименьшая мощность электродвигателей порядка нескольких десятых долей ватта при скоростях вращения до 15 000 *об/мин*, наименьшая скорость вращения 2000 *об/мин*. Все электродвигатели имеют закрытое или защищенное исполнение. Для ограничения радиопомех, создаваемых электродвигателем при работе, предусматривается соответствующая защита и экранировка металлическими оболочками всех электрических частей.

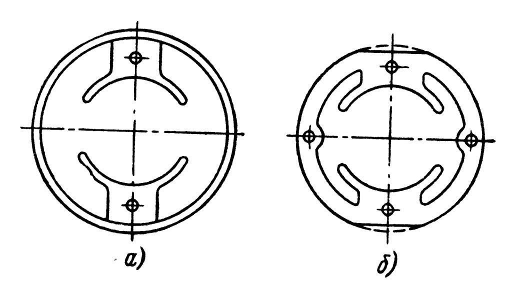


Рис. 1.11. Конструкция магнитной системы маломощных машин:

а — станина с отъемными полюсами; *б* — шихтованная станина и полюс, изготавливаемые заодно

Возбуждение у большинства электродвигателей последовательное. Однако в некоторых случаях, когда, например, требуется относительно постоянная скорость вращения, применяют параллельное возбуждение. Применяется также смешанное возбуждение.

Напряжение исполнительных электродвигателей различных наземных автоматических устройств чаще всего составляет 110 *в*, для электродвигателей общего применения — 220 *в*. Многие маломощные электродвигатели выполняют на напряжение 27, 12 и 6 *в*.

Магнитная система электродвигателей состоит из станины цилиндрической формы, которую выполняют шихтованной из стальных листов или из цельнотянутых труб, и шихтованных полюсов, которые прикрепляют к станине (рис. 1.11, *а*). Иногда шихтованные станины изготовляют заодно с полюсами (рис. 1.11, *б*). Добавочных полюсов маломощные машины не имеют. Станину и полюсы штампуют из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*.

Магнитную систему генераторов малой мощности выполняют в виде сплошной стальной станины (корпуса) с отъемными сплошными или шихтованными полюсами.

В электродвигателях мощностью до 200 *вт* число полюсов обычно равно двум, в более мощных — четырем. Однако электродвигатели и меньшей мощности иногда выполняют четырехполюсными для повышения надежности работы токосъемного устройства за счет параллельной работы двух одноименных щеток из общего числа щеткодержателей.

Обмотки возбуждения выполняют из круглого медного изолированного провода в виде катушек, которые изготовляют предварительно на шаблоне и помещают на полюсы при сборке машины.

Якорь всегда имеет полузакрытые пазы круглой, овальной или прямоугольной формы.

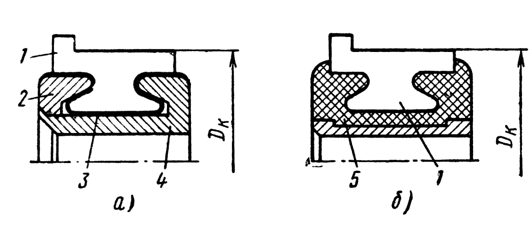


Рис. 1.12. Коллекторы маломощных машин:
а — коллектор с креплением нажимными фланцами; *б* — коллектор с креплением пластмассой; *1* — пластина коллектора; *2* — нажимная шайба; *3* — изоляция; *4* — втулка; *5* — крепление пластмассой

Сердечник якоря изготовляют из пластин, штампованных из листов электротехнической стали марки Э11 толщиной 0,35 или 0,5 *мм*. Сборку пластин в пакет осуществляют или отдельно от вала на специальном кондукторе-оправке или на валу, который должен иметь накатку. Пластины сердечника якоря всегда покрываются изоляционным лаком. В первом случае пакет прессуется и запекается при температуре 120—150° С, после чего изоляционный лак полимеризуется, пакет становится прочным и насаживается на вал; во втором — пакет прессуется на валу и скрепляется двумя нажимными шайбами, запрессованными на накатку вала.

Обмотку якоря выполняют преимущественно из медного изолированного провода круглого сечения, в относительно мощных машинах применяют полузакрытые пазы прямоугольной формы и провод прямоугольного сечения.

В двухполюсных машинах применяют простую петлевую обмотку, в четырехполюсных — простую волновую обмотку якоря.

Крепление в пазах осуществляется текстолитовыми клиньями. Коллекторы выполняют всегда цилиндрической формы (рис. 1.12). Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют друг от друга миканитом или пластмассой.

Щеткодержатели для электродвигателей и генераторов — в основном радиальные трубчатого и коробчатого типов (см. рис. 1.13, *а*, *б*). Щетка в таких щеткодержателях расположена перпендикулярно к коллектору. Давление на щетку в трубчатом щеткодержателе осуществляется непосредственно винтовой пружиной, в коробчатом — ленточной спиральной пружиной.

В машинах со скоростью вращения порядка 10 000 *об/мин* и выше для уменьшения вибрации щеток иногда применяют реактив-

ные (наклонные) щеткодержатели. Щетка в таких щеткодержателях расположена под углом к коллектору.

В низковольтных двигателях малой мощности применяют меднографитовые щетки М1, М6, МГ, в электродвигателях с напряжением 110, 220 *в* — М1, М6, МГ, графитовые Г3, Г8, электрографитированные ЭГ8, ЭГ14.

На рис. 1.14 дан чертеж электродвигателя для привода автоматических устройств.

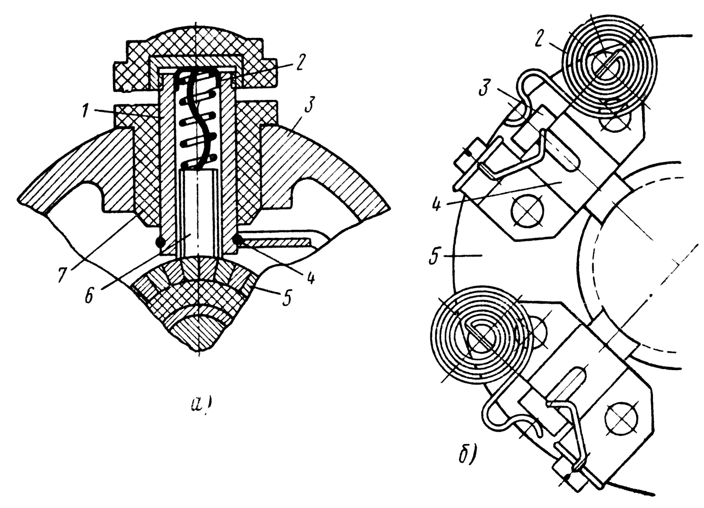


Рис. 1.13. Щеткодержатели маломощных машин:

а — радиальный щеткодержатель; *1* — металлическая втулка; *2* — цилиндрическая пружина; *3* — подшипниковый щит; *4* — зажим; *5* — коллектор; *6* — щетка; *7* — изолирующая втулка;
б — радиальный коробчатый щеткодержатель: *1* — палец пружины; *2* — спиральная пружина; *3* — щетка: *4* — обойма щеткодержателя; *5* — траверса

В приложении 3 приведены основные технические данные маломощных электродвигателей постоянного тока параллельного возбуждения ПЛ и в приложении 4 — исполнительных электродвигателей СЛ.

§ 1.2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА

При расчете электрической машины можно получить ряд вариантов машин с различными размерами, обмотками, электрическими характеристиками и т. п., при этом все они будут в основном отвечать общим требованиям, предъявляемым к ней.

Как известно, число основных уравнений для расчета электрических машин значительно меньше числа параметров, которые требуется получить. Поэтому многими величинами, как, например, магнитной индукцией в воздушном зазоре, линейной нагрузкой якоря, соотношениями некоторых размеров приходится предварительно задаваться. Расчетчик выбирает изоляционные, магнитные

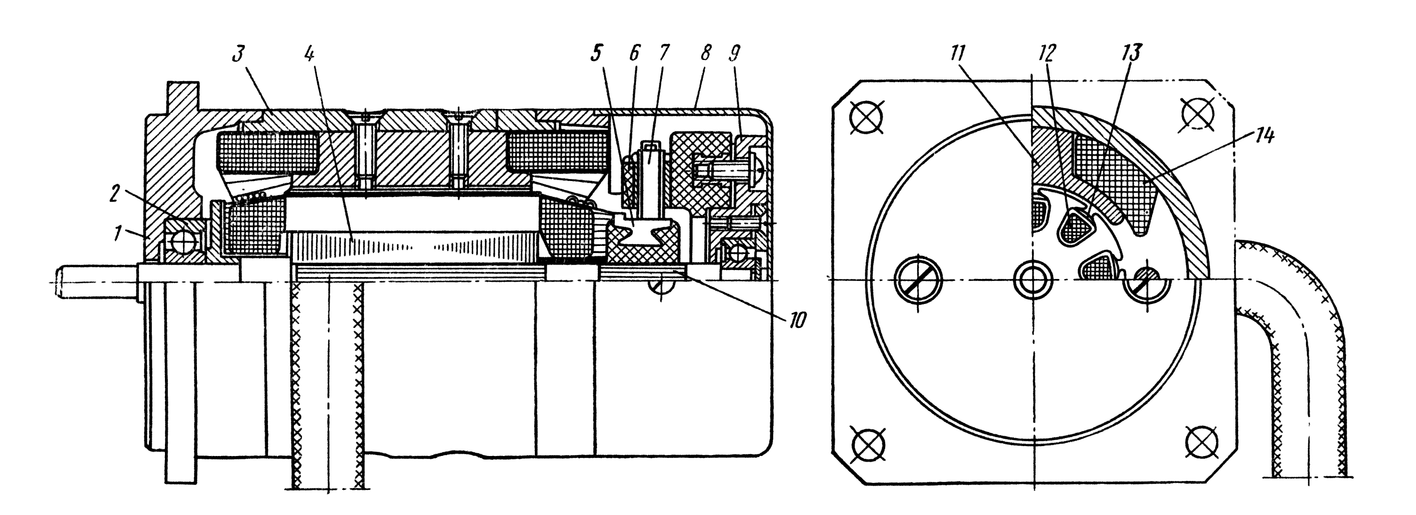


Рис. 1.14. Электродвигатель мощностью 40 *вт* при $n = 10\,000$ *об/мин*:

1 — щит; *2* — подшипник; *3* — станина; *4* — сердечник якоря; *5* — коллектор; *6* — щеткодержатель; *7* — щетка; *8* — колпак; *9* — щит; *10* — вал; *11* — полюс; *12* — обмотка якоря; *13* — клин; *14* — обмотка возбуждения

и конструкционные материалы, систему охлаждения машины. Все это тесно связано между собой. Например, при искусственном охлаждении машины, электромагнитные нагрузки можно выбрать более высокими, чем при естественном охлаждении. Повышение электромагнитных нагрузок позволяет уменьшить вес и габариты. Но при этом следует иметь в виду, что к. п. д. машины вследствие возрастания электрических потерь снизится, а это экономически может быть невыгодно.

Выбрать окончательный вариант машины можно только в том случае, если будут решены все вопросы, возникающие при проектировании машины.

Расчет машины является только одним из этапов проектирования.

Основными этапами проектирования являются:

1) *расчет*, включающий:

а) электромагнитный расчет (основных размеров, магнитной цепи, обмоток, коммутации и характеристик);

б) тепловой расчет;

в) расчет вентиляции;

2) *разработка конструкции;*

3) *разработка технологического процесса;*

4) *технико-экономическое обоснование конструкции машины.*

При расчете необходимо ориентироваться на уже эксплуатируемые электрические машины такого же типа и приблизительно отвечающие тем же требованиям, что и рассчитываемая машина. Характеристики хорошо зарекомендовавших себя машин обобщаются, составляются рекомендации по выбору различных коэффициентов, магнитных и электрических нагрузок, активных и конструкционных материалов и т. п. Все эти данные зависят от типа электрической машины, ее назначения, величины мощности, режима и условий работы.

Естественно, характеристики и рекомендации не могут отразить все многообразие машин и требований к ним. Кроме того, к машинам часто предъявляются противоречивые требования, поэтому приходится отступать от принятых норм и оптимальных соотношений. Количество вариантов расчета в значительной мере определяется опытом расчетчика. (В данном пособии в каждом разделе с целью облегчения расчета и получения более оптимального варианта даются указания, каким образом те или иные величины влияют на характеристики машины, и рекомендации по выбору их.)

Расчет может быть в значительной степени облегчен, если использовать ЦВМ (цифровую вычислительную машину).

Прежде чем приступить к расчету, необходимо внимательно ознакомиться с техническим заданием на проектирование электрической машины, в котором приводятся следующие исходные данные:

1) назначение;

2) условия работы;

3) номинальная мощность на валу для двигателя $P_{2н}$ и номинальная мощность для генератора $P_н$;

4) напряжение $U_н$;

5) номинальная скорость вращения $n_н$;

6) режим работы (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный);

7) система возбуждения (независимая, параллельная, последовательная, смешанная) и напряжение возбуждения;

8) система охлаждения;

9) исполнение (открытое, закрытое защищенное);

10) надежность.

Кроме того, следует ознакомиться с техническими условиями (ТУ) на машину.

В технических условиях (ТУ) оговариваются требования, связанные с назначением машины и с условиями эксплуатации. Например, требования обеспечения минимального веса и габаритов (для машин летательных аппаратов и маломощных), степени надежности работы в нормальных условиях и в условиях повышенной влажности и температуры, вибрации мест крепления, перегрузок.

§ 1.3. ОСНОВНОЕ РАСЧЕТНОЕ УРАВНЕНИЕ

Главными размерами электрической машины считают диаметр $D_я$ и длину $l_я$ якоря. Эти размеры, а также число полюсов $2p$ определяют остальные размеры и вес машины, а соотношение между длиной и диаметром якоря существенно влияет на коммутационные и эксплуатационные характеристики машины (к. п. д., маховой момент, перегрузочную способность), на надежность и стоимость машины.

Главные размеры машины находят из основного расчетного уравнения, устанавливающего связь между размерами $D_я$, l_i, с одной стороны, и электромагнитной мощностью, скоростью вращения якоря и электромагнитными нагрузками, с другой стороны:

$$C,\ \frac{см^3 \cdot об/мин}{квт} = \frac{D_я^2 l_i n}{P_э} = \frac{6{,}1 \cdot 10^7}{\alpha_i A B_\delta}, \qquad (1.1)$$

где C — машинная постоянная;

$D_я$ — диаметр якоря, *см*;

l_i — расчетная длина якоря, *см*;

n — скорость вращения якоря в номинальном режиме работы, *об/мин*;

$P_э$ — электромагнитная мощность, соответствующая номинальному режиму работы, *квт*;

α_i — расчетный коэффициент полюсной дуги;

A — линейная нагрузка обмотки якоря, *а/см*;

B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре, *тл*;

Уравнение (1.1) можно представить иначе:

$$\frac{D_я^2 l_i}{\frac{P_э}{n}} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{\alpha_i A B_\delta} = C. \quad (1.1а)$$

Так **как** $D_я^2 l_i \equiv V_я$ — объему якоря, а $\frac{P_э}{n} \equiv M_э$ — электромагнитному моменту, $\frac{V_я}{M_э} = C$. Следовательно, величина машинной постоянной представляет собой объем якоря, приходящийся на единицу электромагнитного момента, т. е. характеризует степень использования машины. Таким образом, размеры определяются не мощностью, а электромагнитным моментом машины.

Из уравнения (1.1) видно, что при одной и той же мощности размеры машины будут тем меньше, чем больше будут значения электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициента полюсного перекрытия α_i и скорости вращения n. Эти величины вначале выбираются на основе практических рекомендаций, полученных путем анализа изготовленных электрических машин. Однако к таким рекомендациям следует относиться критически, тем более что они чаще всего даются в виде диапазона величин, зависят от типа машины, режима работы, условий охлаждения и не могут одновременно отвечать всем условиям задания.

Кроме того, рекомендуемые значения A, B_δ, α_i, n можно превысить, если в рассчитываемой машине предусмотреть улучшенные * изоляционные и магнитные материалы, осуществить более интенсивную вентиляцию. Если исходить из задачи уменьшения размеров машины, лучшими будут такие изоляционные материалы, которые обладают повышенной теплостойкостью, теплопроводностью, электрической прочностью и имеют уменьшенную толщину изоляции, а магнитные материалы — повышенной магнитной проницаемостью, небольшими удельными потерями, повышенной механической прочностью.

Рассмотрим, каким образом следует выбирать A, B_δ, α_i, n.

1. Линейная нагрузка якоря

Линейная нагрузка якоря — это число амперпроводов, приходящихся на погонный сантиметр длины окружности якоря:

$$A, \frac{a}{см} = \frac{I_я N_я}{2a\pi D_я}, \quad (1.2)$$

где $I_я$ — ток якоря, *а*;

$N_я$ — число эффективных проводов обмотки якоря;

* По сравнению с машинами, на основе которых сделаны рекомендации

$2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря;

$D_я$ — диаметр якоря, *см*.

При выборе большей величины A из рекомендуемого диапазона значений следует принимать во внимание следующее. С увеличением A согласно (1.1) уменьшаются размеры машины, но при этом:

1) растут потери, уменьшается к. п. д., увеличивается нагрев обмотки якоря;

2) ухудшается коммутация машины (возрастает реактивная э. д. с. коммутируемой секции);

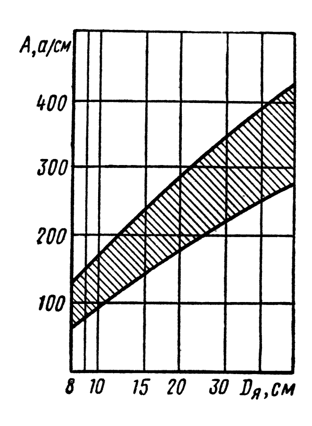


Рис. 1.15. Зависимость линейной нагрузки обмотки якоря A от диаметра якоря $D_я$ для машин общего применения

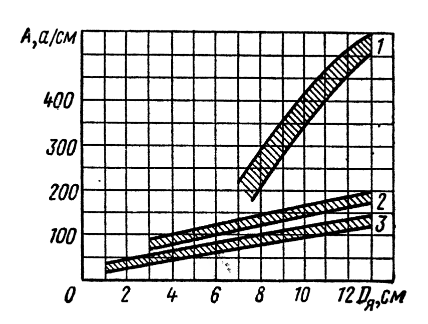


Рис. 1.16. Зависимость линейной нагрузки обмотки якоря A от диаметра $D_я$ для машин летательных аппаратов:

1 — генераторы с продувом; *2* — генераторы и двигатели с самовентиляцией; *3* — двигатели с естественным охлаждением

3) уменьшается перегрузочная способность в машинах малой мощности без дополнительных полюсов с малой величиной воздушного зазора.

В машинах большей мощности (при больших значениях $D_я$) может допускаться большее значение A, так как в этом случае допускается большая реактивная э. д. с.

На рис. 1.15 даны практически рекомендуемые значения линейной нагрузки A для машин общего применения в зависимости от диаметра якоря $D_я$.

Большие значения A рекомендуются для электродвигателей и генераторов общего применения с нормальной скоростью вращения, работающих без перегрузок, при хорошей вентиляции в длительном режиме. Нижняя кривая определяет значения A для тихоходных машин с собственной вентиляцией.

Для генераторов и электродвигателей, устанавливаемых на летательных аппаратах, в связи с тем, что необходимо получить

уменьшенные габариты и вес, рекомендуются более высокие значения линейной нагрузки A. Зависимость $A=f(D_я)$ для машин летательных аппаратов, работающих в длительном режиме, приведена на рис. 1.16.

Для двигателей кратковременного и повторно-кратковременного режимов эти значения увеличивают примерно на $50\div200\%$ и $30\div150\%$ соответственно *.

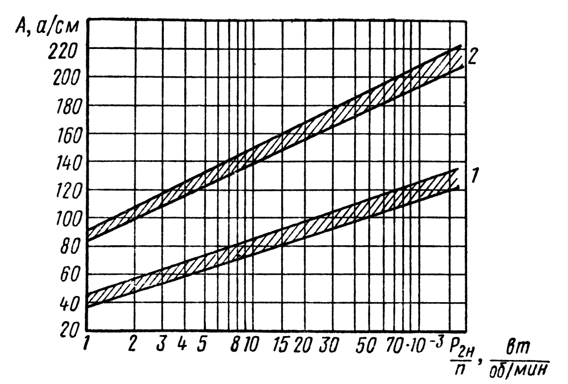


Рис. 1.17. Зависимость линейной нагрузки обмотки якоря A от отношения $\frac{P_{2н}}{n}$ для маломощных машин:

1 — при длительном режиме работы; 2 — при кратковременном режиме работы

Для наземных маломощных машин (мощностью порядка $10\div1000$ *вт*, применяемых в автоматике, бытовых механизмах и др.) при выборе величины A рекомендуется пользоваться зависимостями $A=f\left(\frac{P_{2н}}{n}\right)$, приведенными на рис. 1.17. Для повторно-кратковременного режима величины кривых *2* на рис. 1.17 уменьшают на $20\div30\%$.

2. Магнитная индукция в воздушном зазоре

Согласно (1.1) с целью уменьшения главных размеров машины желательно было бы увеличить индукцию в воздушном зазоре. Однако это целесообразно только до определенного предела, так как с ростом B_δ ухудшаются другие характеристики машины:

1) увеличиваются потери в обмотке возбуждения (так как увеличивается м. д. с. главных полюсов), а также сечение, объем и вес этой обмотки и, следовательно, высота полюса и диаметр станины;

---

* Коэффициент увеличения линейной нагрузки может быть подсчитан. Он зависит от времени работы и паузы и от постоянной времени нагрева электродвигателя (см. [6]).

2) увеличивается магнитная индукция в других частях магнитопровода и соответственно растут магнитные потери в них или увеличивается сечение, объем и вес магнитопровода.

Значение B_δ зависит от величины диаметра якоря $D_я$. Чем больше $D_я$, тем больше допустимые значения B_δ, так как увеличи-

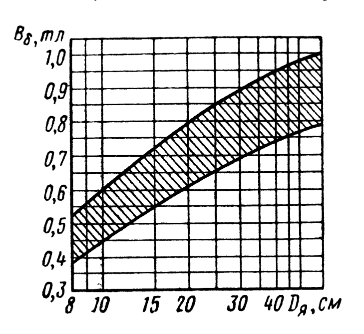


Рис. 1.18. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ от диаметра якоря $D_я$ для машин общего применения

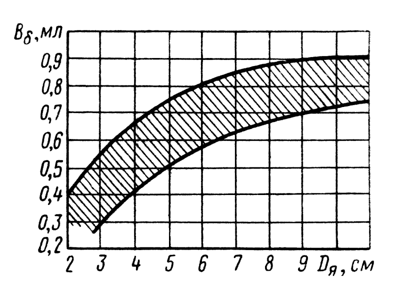


Рис. 1.19. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ от диаметра якоря $D_я$ для машин летательных аппаратов

вается обмоточное пространство междуполюсного окна, что позволяет применять обмотку возбуждения с большей м. д. с. Кроме того, чем больше диаметр якоря, тем больше ширина зубца в основании (а насыщение зубцов определяется насыщением в сечении основания), и поэтому можно увеличить допустимую величину B_δ.

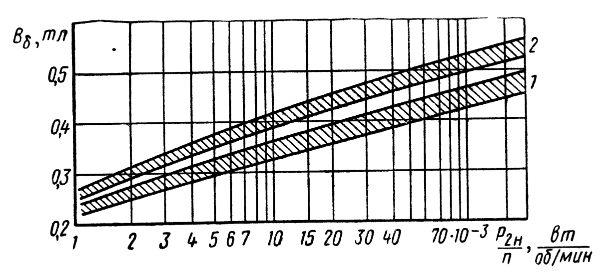


Рис. 1.20. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ от отношения $\frac{P_{2н}}{n}$ для маломощных машин:

1 — при длительном режиме работы; 2 — при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы

Рекомендуемые значения B_δ для машин общего применения длительного режима работы в зависимости от диаметра якоря даны на рис. 1.18. Большие значения рекомендуются для машин с хорошей вентиляцией.

Генераторы и электродвигатели общего применения с нормальной скоростью вращения и небольшими диапазонами регулирования напряжения или скорости вращения целесообразно проектировать с относительно малой индукцией B_δ и несколько повышенной линейной нагрузкой A, так как машины такого типа работают обычно без перегрузок.

Для машин летательных аппаратов с целью уменьшения их размеров и веса и увеличения к. п. д. рекомендуются более высокие величины B_δ, чем для наземных машин, при одинаковой мощности (диаметре). Рекомендуемые значения B_δ для машин летательных аппаратов, работающих в длительном режиме, в зависимости от диаметра якоря $D_я$ приведены на рис. 1.19.

Для маломощных машин при выборе величины B_δ рекомендуются зависимости $B_\delta = f\left(\frac{P_{2н}}{n}\right)$, которые даны на рис. 1.20.

3. Расчетный коэффициент полюсной дуги

Расчетный коэффициент полюсной дуги (рис. 1.21 и далее рис. 1.32)

$$\alpha_i = \frac{b_{i\,гн}}{\tau}, \tag{1.3}$$

где $b_{iгн}$ — расчетная длина полюсной дуги наконечника главного полюса;

τ — полюсное деление якоря.

Расчетный коэффициент полюсной дуги выбирают исходя из рекомендаций.

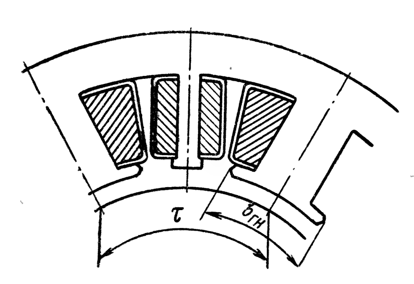


Рис. 1.21. Междуполюсное окно

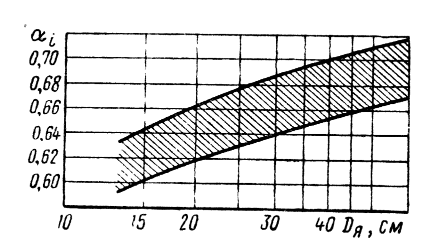


Рис. 1.22. Зависимость расчетного коэффициента полюсной дуги α_i от диаметра якоря $\alpha_i = f(D_я)$ при $2p \geqslant 4$ для машин общего применения

Как следует из уравнения (1.1), увеличение расчетного коэффициента полюсной дуги α_i улучшает использование машины (уменьшаются размеры), но отрицательно влияет на некоторые характеристики машины:

1) увеличивается рассеяние магнитных потоков главных и добавочных полюсов;

2) ухудшаются условия коммутации, так как уменьшается междуполюсное расстояние и увеличивается воздействие поля главных полюсов на коммутирующую секцию, вследствие чего возрастает э. д. с. от поперечного поля реакции якоря;

3) ухудшаются условия размещения главных и добавочных полюсов и их обмоток.

Для машин общего применения с добавочными полюсами выбирают $\alpha_i = 0{,}60 \div 0{,}72$, без добавочных полюсов — $\alpha_i = 0{,}65 \div 0{,}80$.

На рис. 1.22 приведены пределы значений α_i в зависимости от диаметра якоря $D_я$ для машин общего применения с добавочными полюсами при $2p \geqslant 4$. При $2p = 2$ можно выбирать $\alpha_i = 0{,}68 \div 0{,}70$. Меньшие значения рекомендуют для быстроходных, с тяжелой коммутацией машин. Уменьшение α_i позволяет увеличить ширину зоны коммутации и этим улучшить коммутацию.

Для маломощных машин рекомендуется $\alpha_i = 0{,}60 \div 0{,}70$.

Для электродвигателей летательных аппаратов мощностью до 3 *квт* выбирают $\alpha_i = 0{,}55 \div 0{,}72$ (причем большие значения относятся к двигателям большей мощности); мощностью $3 \div 5$ *квт* — $\alpha_i = 0{,}72 \div 0{,}6$ и $5 \div 10$ *квт* — $\alpha_i = 0{,}67 \div 0{,}55$. Уменьшение величин α_i для мощных электродвигателей объясняется стремлением улучшить условия коммутации, поскольку эти двигатели, как правило, имеют высокие линейные нагрузки A, а с ростом A увеличивается величина реактивной э. д. с. в короткозамкнутой секции и, следовательно, ухудшается коммутация. В генераторах для летательных аппаратов $\alpha_i = 0{,}60 \div 0{,}65$.

Значение α_i связано с величиной полюсного деления якоря τ: чем больше τ, тем выше допускается значение α_i, так как при большем τ будет больше ширина нейтральной зоны ($\tau - b_{гн}$), (см. рис. 1.21) и меньше возможность ухудшить коммутацию увеличением α_i.

4. Соотношение между диаметром и расчетной длиной якоря

Из (1.1) следует, что при одном и том же значении машинной постоянной $C = \frac{6{,}1 \cdot 10^7}{\alpha_i A B_\delta}$ можно построить множество вариантов машин, имеющих одинаковое $D_я^2 l_i$, но отличающихся диаметром $D_я$ и длиной l_i якоря.

На характеристики машины большое влияние оказывает соотношение этих размеров $\lambda_я = \frac{l_i}{D_я}$.

Рассмотрим предельные случаи:

1) $l_i \gg D_я$, т. е. $\lambda_я \gg 1$;

2) $l_i \ll D_я$, т. е. $\lambda_я \ll 1$.

В первом случае по сравнению со вторым:

а) меньше вес машины за счет уменьшения веса обмотки якоря, так как уменьшаются длина лобовой части обмотки якоря и вылет лобовых частей; уменьшения веса станины и щитов пропорционально $D_я^2$;

б) больше к. п. д. за счет уменьшения потерь в обмотке якоря, так как уменьшается общая длина обмотки якоря;

в) меньше маховой момент машины $GD^2_я$ и электромеханическая постоянная времени $T_м$ (см. равенство 1.5).

Но при этом в «длинных» машинах:

а) ухудшаются условия охлаждения машины (в машинах с аксиальной вентиляцией возрастает аэродинамическое сопротивление и температура охлаждающего воздуха);

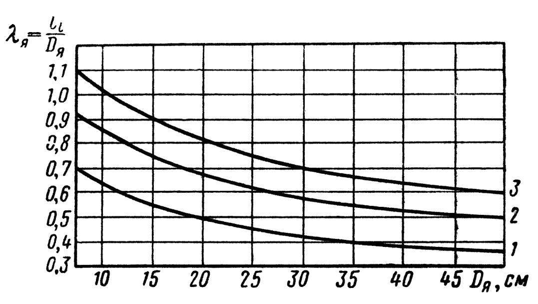


Рис. 1.23. Кривые зависимости $\lambda_я = f(D_я)$: *1* — 3000 *об/мин*; *2* — 1500 *об/мин*; *3* — 1000 *об/мин*

б) ухудшается коммутация, так как возрастает реактивная э. д. с., величина которой пропорциональна l_i;

в) ухудшение охлаждения и коммутации может вызвать необходимость в снижении электромагнитных нагрузок A и B_δ, что в свою очередь вызовет увеличение габаритов и веса;

г) снижается их использование (особенно машин малой мощности) вследствие уменьшения ширины зубцов якоря.

Таким образом, для различных машин существуют свои оптимальные пределы соотношения между диаметром якоря и его длиной.

Для машин общего применения при нормальной скорости вращения n (которая соответствует данным рис. 1.24) $\lambda_я$ целесообразно выбирать около 0,7.

Если скорость вращения отличается от нормальной, рекомендуется пользоваться кривыми зависимости $\lambda_я = f(D_я)$ при различных значениях скорости вращения n на рис. 1.23.

Для машин летательных аппаратов рекомендуются

$$\lambda_я = 0,6 \div 1,2;$$

для маломощных машин —

$$\lambda_я = 0,4 \div 1,6$$

В ряде случаев от рекомендуемых значений $\lambda_я$ приходится отступать:

а) когда требуется уменьшить маховой момент $GD_я^2$, следует увеличивать $\lambda_я$;

б) когда в машинах для летательных аппаратов $D_я$ и $l_я$ выбирают в зависимости от условий размещения (особенно это относится к генераторам), берут

$$\lambda_я = 0,65 \div 0,95.$$

5. Скорость вращения якоря

Из уравнения (1.1) следует, что чем быстроходнее электрическая машина, тем при прочих равных условиях главные размеры ее меньше. Повышение скорости выгодно и в тех случаях, когда благодаря этому можно отказаться от редуктора в исполнительном механизме. Но увеличение скорости вращения якоря выше определенных пределов отрицательно влияет на ряд характеристик электрической машины:

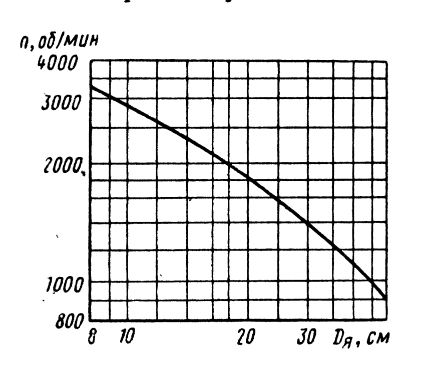


Рис. 1.24. Зависимость нормальной скорости вращения n от диаметра якоря $D_я$

1) уменьшается к. п. д., так как возрастают механические потери и потери в стали (увеличивается частота перемагничивания);

2) ухудшается коммутация;

3) снижается надежность работы коллектора и щеток и срок их службы;

4) увеличиваются механические напряжения во вращающихся частях;

5) снижается срок службы подшипников, а следовательно, и срок службы машины.

Поэтому имеются определенные предельные значения скорости, вращения, которые нецелесообразно, а иногда недопустимо превышать.

Для электрических машин общего применения, летательных аппаратов и маломощных машин эти предельные значения разные.

Для электрических машин общего применения зависимость нормальных скоростей вращения от диаметра якоря $D_я$ показана на рис. 1.24.

Для электродвигателей и генераторов летательных аппаратов допускаются более высокие значения скорости вращения якоря, чем для машин общего применения, так как их срок службы значительно меньше и поэтому для них могут быть допущены более высокие механические напряжения и меньший срок службы подшипников.

Скорость вращения якоря электродвигателей для летательных аппаратов обычно $n = 4000 \div 12\,000$ *об/мин*; в некоторых случаях $n = 15\,000$ *об/мин* (электродвигатели для привода компрессоров).

Генераторы летательных аппаратов имеют меняющуюся скорость вращения якоря в процессе работы, так как она зависит от скорости приводного двигателя; диапазон изменения ее обычно со-

ставляет 2,25 : 1. Скорость вращения якоря генераторов, как правило, $n = 4000 \div 9000$ *об/мин.*

Обычно скорость вращения якоря дается в задании. Поэтому при выборе диаметра якоря $D_я$ следует проверить, будет ли при этом приемлема окружная скорость вращения якоря

$$v_я,\ м/сек = \frac{\pi D_я n}{60} \cdot 10^{-2}. \qquad (1.4)$$

Для маломощных машин допустимые значения $v_я$, как правило, больше, чем для мощных машин, поскольку окружные скорости их меньше из-за малой величины диаметра якоря $D_я$.

Увеличение скорости вращения якоря маломощных электродвигателей с целью уменьшения диаметра якоря $D_я$, когда работа двигателя сопровождается частыми пусками и быстрым реверсом, не всегда выгодно. Это объясняется тем, что, несмотря на уменьшение махового момента $GD_я^2$ якоря благодаря уменьшению его диаметра $D_я$, электромеханическая постоянная времени двигателя $T_м$ может возрасти, поскольку она пропорциональна n^2:

$$T_м,\ сек = \frac{2,7\, GD_я^2\, n^2}{P_{2н}} \cdot 10^{-6}, \qquad (1.5)$$

где $GD_я^2$ — маховой момент якоря, $н \cdot см^2$;

$P_{2н}$ — номинальная мощность двигателя, *вт.*

Рекомендуемые значения окружной скорости вращения якоря $v_я$, м/сек

Машины общего применения ($D_я \leqslant 50$ *см*)	$15 \div 30$
Летательные аппараты	$50 \div 60$
Маломощные машины	$15 \div 25$

Меньшие значения $v_я$ относятся к машинам меньшей мощности.

Если скорость вращения якоря n в задании не указана, ее можно определить для машин общего применения по рис. 1.24.

6. Электромагнитная мощность, к. п. д. и ток якоря

Электромагнитная мощность $P_э$ может быть определена на основании задаваемой номинальной мощности $P_{2н}$ ($P_н$) и к. п. д., которым предварительно следует задаться.

Если положить, исходя из условия получения максимального к. п. д., что в машине постоянные потери (механические: трение в подшипниках, вентиляционные) и потери в стали равны переменным (потери, зависящие от тока нагрузки), электромагнитная $P_э$ и номинальная $P_{2н}$ мощности будут находиться в определенной зависимости.

Для электродвигателей и генераторов общего применения и летательных аппаратов

$$P_э = \frac{1+\eta}{2\eta} P_{2н}\ . \qquad (1.6а)$$

В маломощных генераторах, как правило, постоянные и переменные потери также равны, поэтому уравнение (1.6а) справедливо и для них.

Для маломощных электродвигателей длительного режима практически установлено, что в большинстве случаев переменные потери в среднем составляют две трети общих потерь, тогда

$$P_э = \frac{1 + 2\eta}{3\eta} P_{2н}. \quad (1.6б)$$

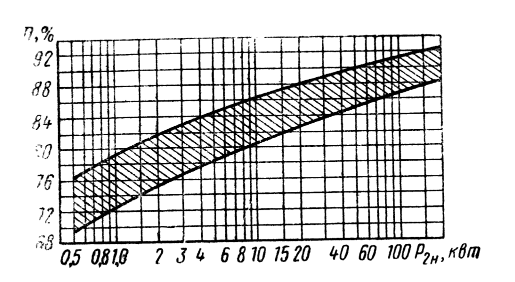


Рис. 1.25. Зависимость коэффициента полезного действия η от номинальной мощности $P_{2н}$ для машин общего применения

В маломощных двигателях повторно-кратковременного и кратковременного режимов переменные потери в среднем составляют около трех четвертей общих потерь. При этом

$$P_э = \frac{1 + 3\eta}{4\eta} P_{2н}. \quad (1.6в)$$

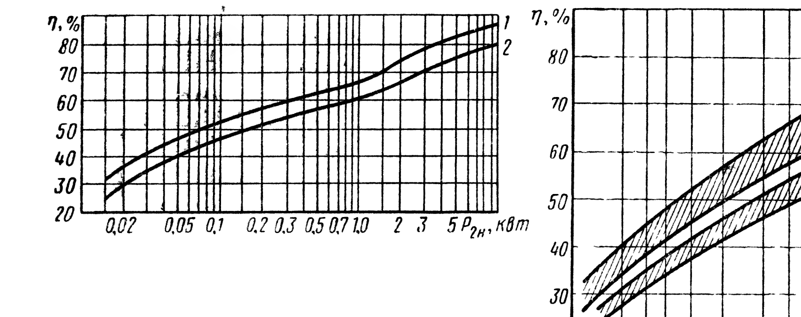


Рис. 1.26. Зависимость коэффициента полезного действия η от номинальной мощности $P_{2н}$ для машин летательных аппаратов:

1 — при длительном режиме работы; 2 — при повторно-кратковременном режиме работы

Рис. 1.27. Зависимость коэффициента полезного действия η от полезной мощности $P_{2н}$ для маломощных машин:

1 — при длительном режиме работы; 2 — при кратковременном режиме работы до 5 *мин*

Пользуясь кривыми на рис. 1.25—1.27, можно предварительно определить к. п. д., а по формулам (1.6а), (1.6б), (1.6в) — величину электромагнитной мощности $P_э$.

7. Ток машины и якоря

Ток генератора

$$I_{1,\ a} = \frac{P_{н}}{U_{н}}. \quad (1.7а)$$

Ток электродвигателя

$$I_{1,\ a} = \frac{P_{2н}}{\eta U_{н}}, \quad (1.7б)$$

где $P_{н}$, $P_{2н}$, $U_{н}$ — см. задание;
η — см. рис. 1.25—1.27.

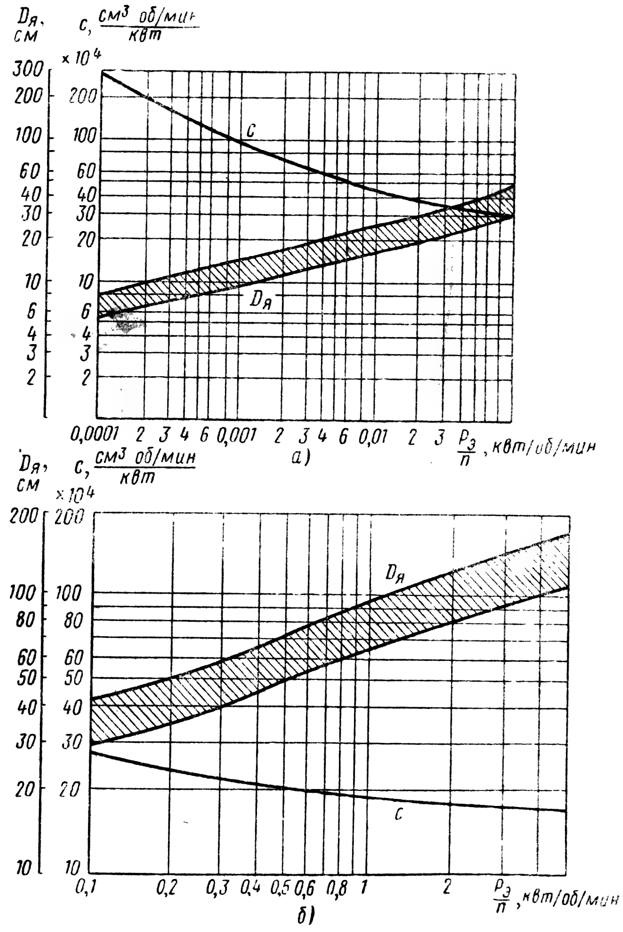


Рис. 1.28. Зависимость диаметра якоря $D_я$ и C от отношения $\frac{P_э}{n}$ для машин общего применения

Ток якоря в общем случае отличается от тока машины и зависит от системы возбуждения:

а) при последовательном возбуждении для генератора и электродвигателя

$$I_{я,\ a} = I_1; \qquad (1.8а)$$

б) при параллельном и смешанном возбуждении:

для генератора $I_{я,\ a} = I_1 + I_ш$,

для электродвигателя $I_{я,\ a} = I_1 - I_ш$, (1.8б)

где $I_ш$ — ток в параллельной (шунтовой) обмотке.

Как правило, ток в параллельной обмотке составляет $I_ш = (0{,}025 \div 0{,}040)\ I_я$.

8. Диаметр и длина якоря

Для того чтобы определить основные размеры машины ($D_я$ и $l_я$), обобщают опыт проектирования машин различных типов и рекомендуют зависимости $C = f\left(\frac{P_э}{n}\right)$ и $D_я = f\left(\frac{P_э}{n}\right)$. Эти зависимо-

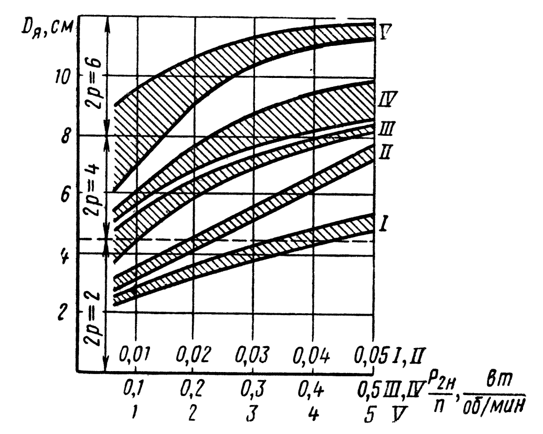


Рис. 1.29. Зависимость диаметра якоря $D_я$ от отношения $\frac{P_{2н}}{n}$ для электродвигателей летательных аппаратов:

I — при повторно-кратковременном режиме работы и естественном охлаждении; *II* — при длительном режиме работы и естественном охлаждении; *III* — при длительном режиме работы и самовентиляции; *IV* — при повторно-кратковременном режиме работы и естественном охлаждении; *V* — при повторно-кратковременном режиме работы и естественном охлаждении

сти для машин общего применения представлены на рис. 1.28, *а*, *б*, для электродвигателей летательных аппаратов $D_я = f\left(\frac{P_{2н}}{n}\right)$ — на рис. 1.29; для генераторов летательных аппаратов — на рис. 1.30.

Определив по кривым для этих машин $D_я$, согласно (1.1) можно установить l_i:

$$l_i, \ см = \frac{6{,}1 \cdot 10^7 P_э}{\alpha_i A B_\delta n D_я}. \tag{1.9}$$

После этого следует проверить отношение $\lambda_я = \frac{l_i}{D_я}$. В случае несоответствия $\lambda_я$ рекомендуемым для данного типа машины значениям, необходимо так изменить величину $D_я$, чтобы обеспечить приемлемую величину $\lambda_я$.

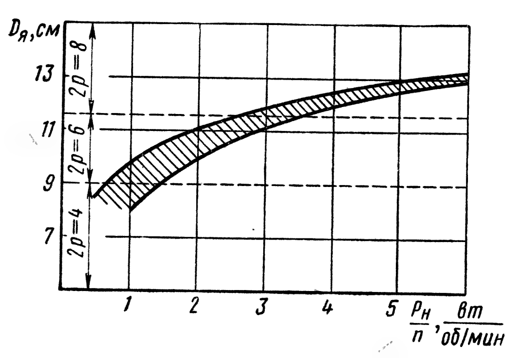


Рис. 1.30. Зависимость диаметра якоря $D_я$ от отношения $\frac{P_н}{n}$ для генераторов летательных аппаратов

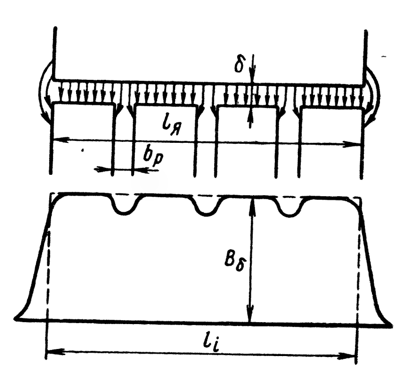


Рис. 1.31. Распределение индукции в воздушном зазоре в осевом направлении

Определять $D_я$ можно и из уравнения (1.1), задавшись рекомендуемым отношением $\lambda_я = \frac{l_i}{D_я}$:

$$D_я, \ см = \sqrt[3]{C \frac{P_э}{\lambda_я n}}, \tag{1.10}$$

где из (1.1)

$$C, \ \frac{см^3 \cdot об/мин}{квт} = \frac{6{,}1 \cdot 10^7}{\alpha_i A B_\delta},$$

или находят по кривым рис. 1.28, *а*, *б*, для машин общего применения.

Расчетная длина якоря (см. рис. 1.31)

$$l_i = \lambda_я D_я. \tag{1.11}$$

Полная длина якоря при отсутствии радиальных вентиляционных каналов

$$l_я \cong l_i, \tag{1.12a}$$

при наличии радиальных каналов

$$l_я = l_i + \frac{1}{3} n_р b_р, \qquad (1.12б)$$

где $n_р$ — число радиальных каналов; определяется из условия, что длина пакета должна находиться в пределах 4,5÷6,5 *см* (верхний предел относится к более коротким машинам);

$b_р$ — ширина радиальных каналов ($b_р \approx 1{,}0$ *см*).

§ 1.4. ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Учитывая замечания в § 1.3 относительно величин, входящих в основное расчетное уравнение (1.1), можно предварительно определить главные размеры машины — $D_я$, l_i и $l_я$.

Рекомендуется следующий порядок определения главных размеров электрических машин.

1. Определяют к. п. д. машины (для машин общего применения по кривым рис. 1.25, для машин летательных аппаратов — рис. 1.26, для маломощных машин — рис. 1.27).

2. Находят электромагнитную мощность $P_э$ для машин общего применения и маломощных из уравнений (1.6а), (1.6б), (1.6в).

3. Подсчитывают отношение $\frac{P_э}{n}$ для машин общего применения и маломощных и $\frac{P_н}{n}$ для машин летательных аппаратов.

4. Выбирают значения $D_я$ и C по кривым рис. 1.28, *а*, *б* для машин общего применения и по кривым рис. 1.29 для машин летательных аппаратов. Величина $D_я$ для машин общего применения округляется до ближайшего значения по таблице приложения 5 (предпочтительны подчеркнутые размеры, так как эти величины используют для единых серий машин).

5. Проверяют величину окружной скорости вращения якоря по (1.4) и рекомендуемым значениям в § 1.3 п. 5.

6. Выбирают значения:

а) A — по кривым рис. 1.15 (машины общего применения), рис. 1.16 (машины для летательных аппаратов), рис. 1.17 (маломощные машины) с учетом замечаний в § 1.3, п. 1;

б) B_δ — по кривым рис. 1.18 (машины общего применения), рис. 1.19 (машины летательных аппаратов), рис. 1.20 (маломощные машины) с учетом замечаний в § 1.3, п. 2;

в) α_i — по рекомендациям в § 1.3, п. 3.

7. Для машин общего применения и летательных аппаратов определяют:

а) значение l_i из уравнения (1.9);

б) $\lambda_я = \frac{l_i}{D_я}$ и проверяют его соответствие рекомендуемым в § 1.3, п. 4 значениям;

в) полную длину якоря по уравнению (1.12а или 1.12б).

8. Для маломощных машин определяют:

а) значение машинной постоянной C из уравнения (1.1);

б) $\lambda_я$ согласно рекомендациям в § 1.3, п. 4;

в) значение $D_я$ по уравнению (1.10);

г) величину l_i по уравнению (1.11) и $l_я$ по уравнению (1.12а) или (1.12б);

д) величину окружной скорости якоря по уравнению (1.4) и сравнивают с допустимой.

§ 1.5. ВЫБОР ЧИСЛА ПОЛЮСОВ. ПОЛЮСНОЕ ДЕЛЕНИЕ, РАСЧЕТНАЯ ДЛИНА ПОЛЮСНОЙ ДУГИ

1. Число полюсов $2p$

Увеличение числа полюсов до определенных пределов положительно сказывается на весе и размерах машины. (На величину диаметра и длины якоря, как следует из (1.1), число полюсов влияния не оказывает.)

При увеличении числа полюсов $2p$:

1) уменьшаются вес и размеры стали. Это объясняется тем, что при увеличении числа полюсов уменьшается поток одного полюса $\Phi_я$, так как для машины данных размеров якоря $D_я$ и l_i при постоянной величине индукции в воздушном зазоре B_δ значение $2p\Phi_я = \text{const}$. Уменьшение потока одного полюса позволяет уменьшить сечение полюсов, спинки якоря и станины;

2) уменьшается вес меди обмотки якоря, поскольку уменьшается полюсное деление τ, а следовательно, длина и вылет лобовой части обмотки якоря;

3) уменьшаются осевая длина коллектора, так как возрастает число щеточных болтов, и ток, приходящийся на один щеточный болт $I_\delta = \frac{I_я}{p}$; поэтому на каждый из них можно посадить меньше щеток.

Увеличение числа полюсов ограничено следующим:

1) уменьшается расстояние между главными и добавочными полюсами, вследствие чего:

а) уменьшается допустимое значение коэффициента полюсной дуги α_i (см. § 1.3, п. 3);

б) увеличивается коэффициент магнитного рассеяния главных и добавочных полюсов;

в) затрудняется размещение главных и добавочных полюсов;

2) повышается частота перемагничивания железа $\left(f = \frac{pn}{60}\right)$, поэтому возрастают потери в стали якоря и полюсных наконечниках на вихревые токи (пропорциональны квадрату частоты) и на гистерезис (пропорциональны частоте);

3) в малых машинах из-за уменьшения сечения спинки статора и станины снижается их жесткость;

4) трудно располагать щетки на коллекторе, поэтому может возникнуть необходимость увеличить диаметр коллектора $D_к$;

5) увеличивается напряжение между коллекторными пластинами;

6) повышается стоимость производства вследствие возрастания трудоемкости.

Выбор числа полюсов зависит и от типа обмотки. При использовании петлевых обмоток, у которых число параллельных ветвей $2a=2p$, уменьшение числа полюсов $2p$ ведет к уменьшению числа проводников обмотки якоря $N_я$, что следует из (1.2):

$$N_я=\frac{\pi D_я A}{\frac{I_я}{2a}}.$$

При этом уменьшается количество изоляционного материала в зубцовой зоне и таким образом уменьшается насыщение в зубцах якоря, что позволяет сократить длину якоря.

Если в этом случае число витков в секции якоря $w_{с.я}=1$, (что бывает в крупных машинах), то уменьшается число коллекторных пластин, равное тогда $K=\frac{N_я}{2}$ и увеличивается ширина коллекторного деления $\tau_к=\frac{\pi D_к}{K}$ ($D_к$ — диаметр коллектора). Кроме того можно применять более широкие щетки и соответственно увеличивать ширину зоны коммутации и уменьшать реактивную э. д. с.

Предварительно выбранное на данном этапе расчета число пар полюсов затем корректируется.

Первоначально при выборе числа пар полюсов для машин общего применения можно исходить из того, что желательно обеспечить частоту перемагничивания в якоре $f=50—70$ *гц*; тогда

$$p=\frac{(3000—4200)}{n}.$$

Рекомендуемые значения чисел полюсов $2p$ для машин общего применения и летательных аппаратов даны в табл. 1.4.

Таблица 1.4

	Машины общего применения			Машины для летательных аппаратов					
				Электродвигатели			Генераторы		
$D_я$, *см*	до 20	20—30	35—135	2—4,5	4,5—8	8—12	до 9	9—12	более 12
$2p$	2	4	6	2	4	6	4	6	8

Для маломощных машин рекомендуется выбирать $2p=2$ при мощностях до 200 *вт*, $2p=4$ — более 200 *вт*.

2. Полюсное деление τ

Размеры полюсного деления τ определяются числом полюсов $2p$:

$$\tau = \frac{\pi D_я}{2p}, \qquad (1.13)$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8; $2p$ — см. § 1.5, п. 1.

В машинах общего применения полюсное деление $\tau=12$—40 *см*, в машинах для летательных аппаратов — $\tau=3$—6 *см*. Если размер полюсного деления выходит за эти пределы, следует подумать о правильности выбора числа полюсов $2p$.

3. Полюсная дуга $b_{гн}$

Длина полюсной дуги $b_{гн}$ (см. рис. 1.32) в машинах общего применения и для летательных аппаратов при равномерном воздушном зазоре обычно

$$b_{гн} = b_{i\,гн} - 2\delta. \qquad (1.14а)$$

Здесь δ — воздушный зазор между якорем и главным полюсом;

$b_{i\,гн}$ — расчетная длина полюсной дуги наконечника главного полюса,

$$b_{i\,гн} = \alpha_i \tau, \qquad (1.15)$$

где α_i — см. § 1.3, п. 3; τ — см. (1.13).

Для маломощных двухполюсных машин с неравномерным воздушным зазором

$$b_{гн} = (1{,}02 \div 1{,}03)\, b_{i\,гн}. \qquad (1.14б)$$

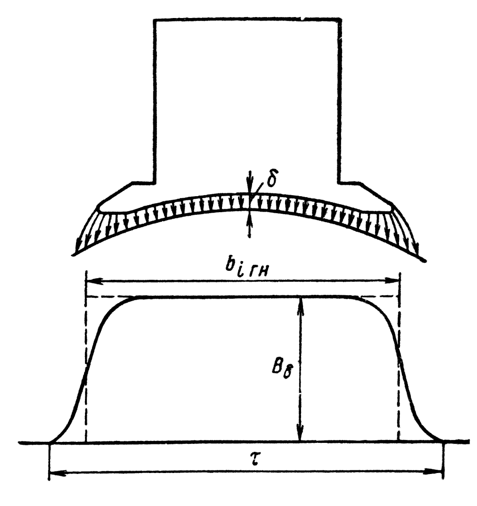


Рис. 1.32. Распределение индукции в воздушном зазоре в аксиальном направлении

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАСЧЕТ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

§ 2.1. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ

Основными типами обмоток электрических машин постоянного тока являются *волновые* (последовательные) (рис. 2.1) и *петлевые* (параллельные) (рис. 2.2). Они бывают *простыми* — одноходовыми (рис. 2.1, 2.2) и *сложными* — многоходовыми.

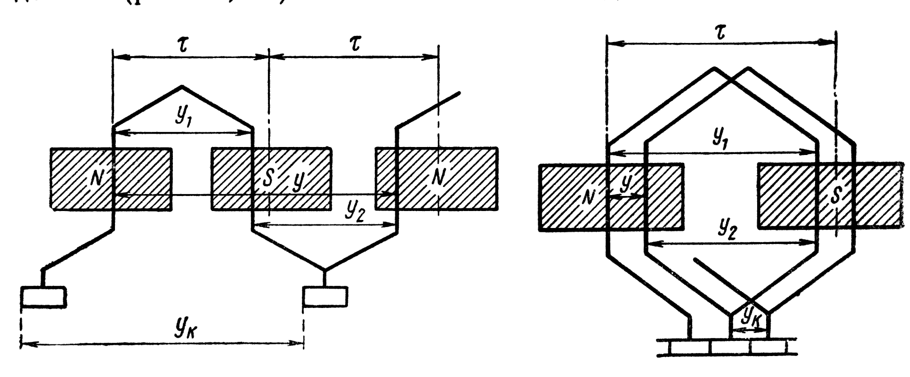


Рис. 2.1. Элемент простой волновой обмотки

Рис. 2.2. Элемент простой петлевой обмотки

В простой волновой обмотке число параллельных ветвей $2a=2$, в простой петлевой обмотке $2a=2p$.

Сложные обмотки состоят из нескольких простых, соединенных параллельно.

Рис. 2.3. Элемент «лягушачьей» обмотки

Кроме того, применяют смешанные обмотки, называемые лягушачьими (рис. 2.3). «Лягушачья» обмотка представляет собой сочетание волновой и петлевой обмоток. Каждая из составляющих обмоток (волновая и петлевая) изготовляется из провода одинакового сечения, имеет одинаковое число витков и параллельных ветвей и присоединяется к одним и тем же коллекторным пластинам.

По расположению в пазах обмотки могут быть однослойными и двухслойными. Наиболее распространены двухслойные.

Простые волновые обмотки обладают следующими преимуществами по сравнению с простыми петлевыми:

а) в волновых обмотках не возникают уравнительные токи, поскольку активные проводники каждой ветви обмотки располагаются под всеми полюсами, что обеспечивает их симметричность (в петлевой обмотке каждая ветвь только под одной парой полюсов);

б) число проводников простой волновой обмотки в a раз меньше, чем в простой петлевой, а сечение меди — в a раз больше;

в) длина провода волновой обмотки в a раз меньше, чем петлевой;

г) стоимость провода и намотки волновой обмотки ниже, чем петлевой.

Таким образом, выгоднее обмотку выполнять волновой. Но при этом следует учитывать значение тока в параллельной ветви обмотки якоря. Если его величина выше допускаемой (см. § 2.2, п. 2), обмотку следует выполнять петлевой.

Если $2p=2$ и ток якоря не превышает 600 *а* у машин общего применения или 300 *а* у машин для летательных аппаратов, рекомендуется простая волновая обмотка. При больших значениях тока якоря следует выбирать простую петлевую обмотку.

Если $2p=2$, применяют простую петлевую обмотку, которая при этом в электрическом отношении не отличается от волновой, но волновую труднее выполнить.

Сложную петлевую обмотку применяют в машинах малой мощности при напряжении 24 *в* и большой мощности (выше 500 *квт*) при напряжении выше 110 *а*.

Сложную волновую обмотку используют в машинах средней мощности (50—500 *квт*) при напряжении 110 *в* и выше.

Применение «лягушачьей» обмотки исключает необходимость во внешних уравнительных соединениях, обеспечивает лучшую коммутационную способность. Их рекомендуют в тех случаях, когда машина имеет тяжелые условия коммутации, высокую окружную скорость. Недостатками «лягушачьей» обмотки являются более сложное изготовление и ремонт, меньшее заполнение паза медью, худшие условия охлаждения лобовой части обмотки.

§ 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ

1. *Число параллельных ветвей* $2a$ определяется типом выбранной обмотки якоря.

2. *Ток параллельной ветви* (*а*)

$$i_я=\frac{I_я}{2a} . \qquad (2.1)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $2a$ — см. § 2.1.

По условиям коммутации и технологичности в машинах общего применения $i_я$ должно быть не более 300 *а*, для машин летательных аппаратов — 100÷150 *а*.

Если $i_я$ будет превышать эти величины, следует увеличить число параллельных ветвей и вместо простой волновой обмотки использовать петлевую.

3. *Число эффективных проводов обмотки*

$$N_я = \frac{\pi D_я A}{i_я}, \qquad (2.2)$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8; A — см. § 1.3, п. 1; $i_я$ — см. (2.1).

Далее выбирают числа витков в секции $w_{ся}$, коллекторных пластин K, пазов Z и рядом лежащих в пазу секционных сторон $u_п$. Обычно сравнивают несколько вариантов с различными значениями $w_{ся}$, K, $u_п$, Z.

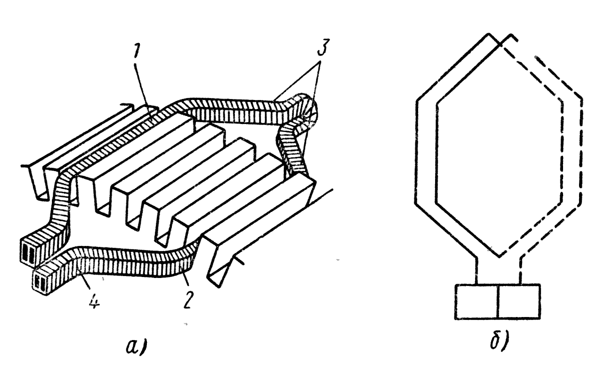


Рис. 2.4. Распределение секций петлевой обмотки в пазах (*а*) и схематическое изображение двухвитковой секции простой петлевой обмотки (*б*): *1, 2* — активные стороны; *3, 4* — лобовые части

4. *Число витков в секции якоря* $w_{ся}$.

Секцией обмотки якоря называют ту ее часть, которая лежит между двумя коллекторными пластинами, следующими друг за другом при обходе обмотки (рис. 2.4, *а*);

$$w_{ся} = \frac{N_я}{2K} = \frac{N_я}{2a} \cdot \frac{a}{K}, \qquad (2.3)$$

где $N_я$ — см. (2.2); K — число коллекторных пластин.

Секция может состоять или из одного витка (на рис. 2.2 $w_{ся} = 1$) или из нескольких последовательно включенных витков (на рис. 2.4, *б* каждая сторона секции состоит из двух витков).

Для облегчения условий коммутации (уменьшения э. д. с. в короткозамкнутой секции) рекомендуется, чтобы число $w_{ся}$ было минимальным.

У машин общего применения мощностью выше 25—30 *квт* число витков принимают $w_{ся}=1$, у машин мощностью 1—20 *квт* — $w_{ся}=2$. Это обусловлено тем, что поток $\Phi_я$ маломощных машин имеет небольшое значение, и поэтому даже при использовании простой волновой обмотки ($a=1$) $N_я$ имеет большое значение *.

* Согласно формуле для э. д. с. обмотки якоря

$$N_я = \frac{60a}{pn} \cdot \frac{E}{\Phi_я}.$$

При большом $N_я$ число коллекторных пластин $K=\frac{N_я}{2w_{ся}}$ может оказаться настолько большим, что их нельзя будет выполнить, так как это повлечет за собой уменьшение размеров пластины сверх допустимой величины.

Для машин летательных аппаратов и маломощных полученное значение $w_{ся}$ можно сопоставить с рекомендуемыми значениями в табл. 2.1.

Таблица 2.1

P_2, *вт*	10	10—30	30—100	100—1000	>1000
$w_{ся}$	50—25	25—10	10—5	3—2	1

5. *Число коллекторных пластин*

$$K=\frac{N_я}{2w_{ся}}. \tag{2.4}$$

Приемлемость полученного значения K следует проверить, исходя из следующего.

Для машин общего применения K (из 2.4) проверяют по допускаемому значению среднего напряжения между коллекторными пластинами

$$u_{к\cdot ср}=\frac{2pU_н}{K}, \tag{2.5}$$

где $2p$ — см. § 1.5, 1, $U_н$ — см. задание.

Допускаемые значения для машин без компенсационной обмотки

$$u_{к\cdot ср}=12-16 \ в;$$

с компенсационной обмоткой

$$u_{к\cdot ср}=16-22 \ в.$$

Меньшие цифры относятся к более мощным машинам.

Если $u_{к.ср}$ будет превосходить допускаемую величину при $w_{ся}=1$, следует увеличить число параллельных ветвей обмотки якоря a.

Для машин летательных аппаратов, полученное по (2.4) значение K можно сопоставить с табл. 2.2.

Для маломощных машин K определяют по числу пазов якоря Z, которое в свою очередь находят по $D_я$ (см. далее):

$$K=(1\div 3)\,Z. \tag{2.4a}$$

Таблица 22

$D_я$, *см*	3	4	5	6	7	8	10
K	20—30	30—60	50—75	60—85	75—90	70—100	80—110

Если полученное значение K будет больше допустимого рекомендациями, то нужно выбрать большее значение $w_{ся}$, дающее более приемлемое значение K.

Для выполнения условия симметрии обмотки, отношение K/a должно быть целым числом.

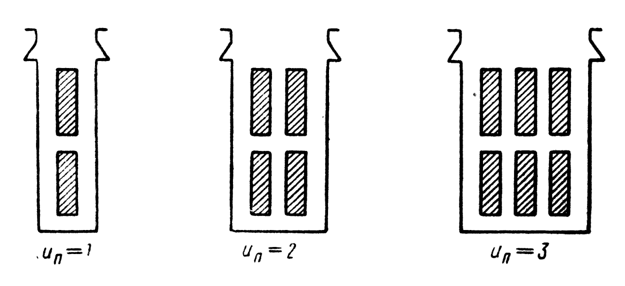


Рис. 2.5. Реальные и элементарные пазы якоря

6. *Число рядом лежащих в пазу секционных сторон* $u_п$ по ширине паза (или число элементарных пазов в одном реальном). *Элементарным* пазом называют одну или две секционные стороны, расположенные в реальном пазу одна под другой (см. рис. 2.5). Обычно $u_п=1$, 2, 3, 4, 5... Чем больше $u_п$, тем лучше заполнение зубцовой зоны, но хуже условия коммутации.

$u_п=1$ только в низковольтных машинах. Для простой симметричной волновой обмотки $u_п$ не должно иметь общего делителя с p.

7. *Число пазов Z*

Задавшись $u_п$, определяют число пазов Z:

$$Z=\frac{K}{u_п}, \tag{2.6}$$

согласуя его с рекомендациями, полученными на основе опыта построенных машин.

Для машин с $D_я>30$ *см*

$$Z=(0{,}78\div1{,}55)\,D_я;$$

с $D_я<30$ *см*

$$Z=(1\div3)\,D_я.$$

Для маломощных машин

$$Z=(3\div4)\,D_я.$$

Большие значения внутри перечисленных диапазонов относятся к машинам с меньшим $D_я$.

С увеличением Z:

а) улучшается коммутация;

б) уменьшается амплитуда зубцовых пульсаций главного потока;

в) снижаются добавочные потери.

Но значительное увеличение Z усложняет технологию, влечет за собой повышение стоимости машины и может привести к недопустимому уменьшению ширины зубца.

Для улучшения коммутации и уменьшения пульсаций главного потока рекомендуется, чтобы отношение Z/p было нечетным числом. В машинах небольшой мощности, кроме этого, иногда делают скос пазов якоря на $(0{,}5 \div 1{,}0)\,t_1$, где $t_1=\frac{\pi D_я}{Z}$ — пазовое (зубцовое) деление.

Для обеспечения условий симметрии петлевой обмотки отношение $\frac{Z}{p}=\frac{Z}{a}$ должно быть целым числом. Для волновой обмотки Z и p должны быть взаимно простыми числами (не иметь общего делителя).

Рекомендуется проверить выбранную величину Z по условию

$$\frac{Z}{p}=7 \div 30.$$

Чем меньше мощность машины, тем ниже значение Z/p.

Определив K, $u_п$ и Z, уточняют число витков $w_{ся}$, округляя его до целого значения, и уточняют значение $N_я=2Kw_{ся}$.

Затем находят линейную нагрузку якоря

$$A=\frac{N_я i_я}{2\pi D_я}, \qquad (2.7)$$

сравнивая ее с линейной нагрузкой в § 1.3, п. 1 (допускается отклонение $\pm 5\%$).

В машинах небольшой мощности иногда многовитковые обмотки выполняются с дробным числом $w_{ся}$, т. е. секции, расположенные в одном слое паза, имеют разные числа витков.

8. *Число эффективных проводов в пазу*

$$N_п=\frac{N_я}{Z}. \qquad (2.8)$$

Величину $N_п$ следует проверить по условию коммутации и нагрева: $i_я N_п < 1500$ *а*. Если это условие не выполняется, следует уменьшить значение $u_п$ и, соответственно, скорректировать значения Z и K.

9. *Шаги обмотки по пазам и коллектору*

На рис. 2.1, 2.2, 2.3 буквами обозначены шаги обмоток:

y — результирующий шаг;
y_1 — первый частичный шаг;
y_2 — второй частичный шаг;
$y_к$ — шаг по коллектору;
$y_п$ — шаг по пазам.

а) Петлевая обмотка (рис. 2.6, *а*).

$$\left.\begin{array}{l} y=y_к=y_1-y_2 \text{ — основное свойство обмотки;} \\ y_1=\dfrac{K}{2p}\pm\varepsilon;\ y_2=y_1-y. \end{array}\right\} \quad (2.9)$$

Укорочение или удлинение обмотки ε следует выбирать небольшой величины, чтобы не увеличивать коммутационную зону. Если $\varepsilon=0$, обмотку называют диаметральной, если $\varepsilon\neq 0$ — с укорочением (—) или с удлинением (+).

Удлинение шага нежелательно, поскольку при этом увеличивается вылет лобовой части обмотки;

$$\left.\begin{array}{l} y=y_к=\pm 1 \text{ — простая петлевая обмотка;} \\ y=y_к=\pm g \text{ — сложная петлевая обмотка;} \\ g \text{ — кратность ходов обмотки.} \end{array}\right\} \quad (2.9а)$$

Знак плюс соответствует неперекрещенной обмотке, знак минус — перекрещенной.

б) Волновая обмотка (см. рис. 2.6, *б*).

$$\left.\begin{array}{l} y=y_к=y_1+y_2 \text{ — основное свойство обмотки;} \\ y_1=\dfrac{K}{2p}\pm\varepsilon;\ y_2=y-y_1, \end{array}\right\} \quad (2.10)$$

где ε — см. замечания в п. а:

$$\left.\begin{array}{l} y=\dfrac{K\mp 1}{p} \text{ — простая волновая обмотка;} \\ y=\dfrac{K\mp g}{p} \text{ — сложная волновая обмотка;} \\ g \text{ — кратность ходов обмотки.} \end{array}\right\} \quad (2.10а)$$

Знак минус соответствует неперекрещенной обмотке, знак плюс — перекрещенной.

Шаг по пазам

$$y_п=\frac{y_1}{u_п}. \quad (2.11)$$

в) «Лягушачья» обмотка (см. рис. 2.6, *в*), как отмечалось, представляет собой сочетание петлевой и волновой обмоток, поэтому шаги каждой из составляющих обмоток рассчитывают так, как показано в п. а) и б).

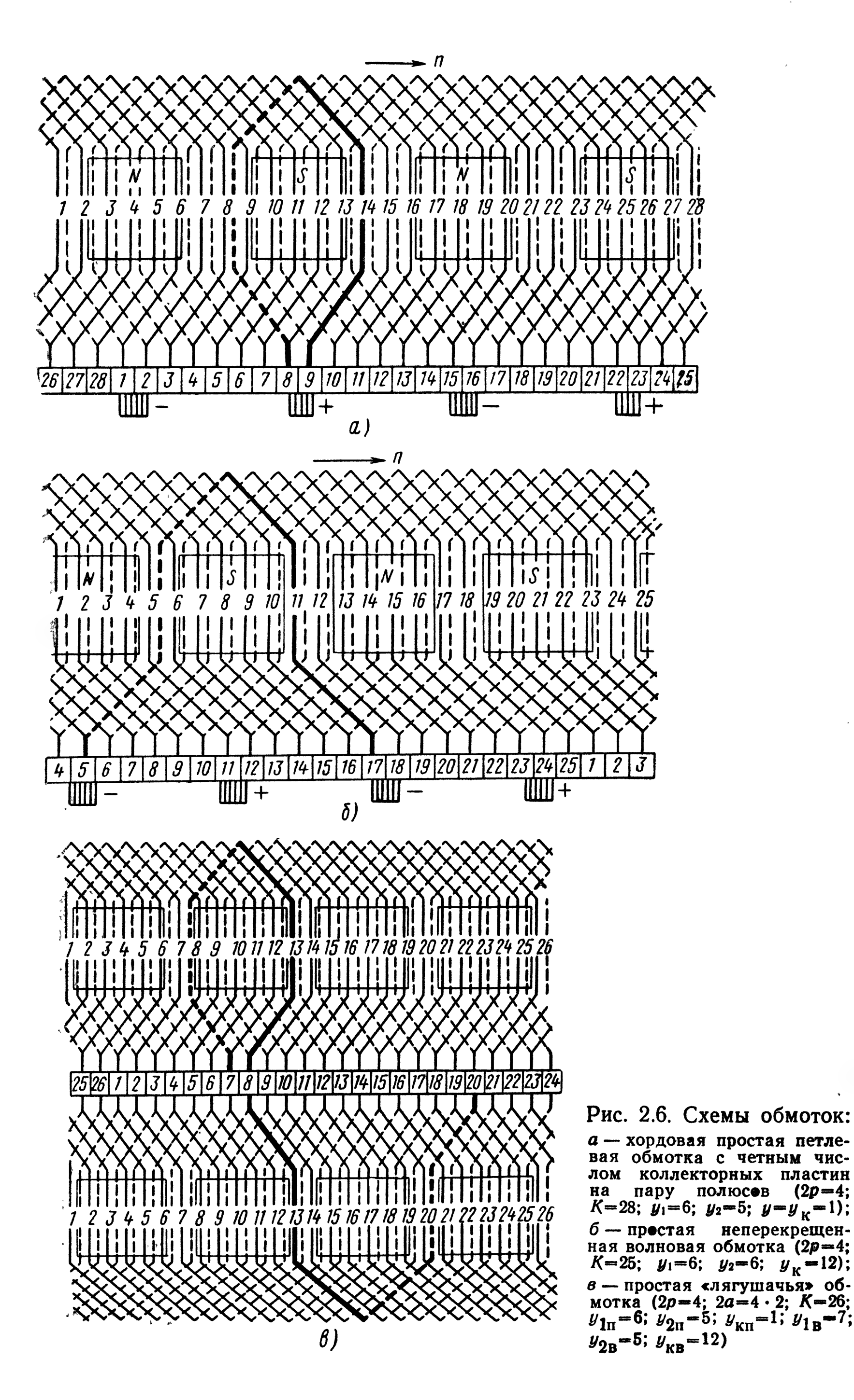


Рис. 2.6. Схемы обмоток:

а — хордовая простая петлевая обмотка с четным числом коллекторных пластин на пару полюсов ($2p=4$; $K=28$; $y_1=6$; $y_2=5$; $y=y_{к}=1$);

б — простая неперекрещенная волновая обмотка ($2p=4$; $K=25$; $y_1=6$; $y_2=6$; $y_{к}=12$);

в — простая «лягушачья» обмотка ($2p=4$; $2a=4\cdot 2$; $K=26$; $y_{1п}=6$; $y_{2п}=5$; $y_{кп}=1$; $y_{1в}=7$; $y_{2в}=5$; $y_{кв}=12$)

Необходимо выдержать правильно соотношение между шагами, которое обеспечивает условие выполнимости равносекционной «лягушачьей» обмотки:

$$\left.\begin{aligned} y_{кп}+y_{кв}&=\frac{K}{p};\\ y_{1п}+y_{1в}&=\frac{K}{p};\\ y_{2п}&=y_{2в},\end{aligned}\right\} \qquad (2.12)$$

где буква «п» означает петлевую обмотку, «в» — волновую.

§ 2.3. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Внутри обмоток, несмотря на выполнение всех условий симметрии, возникает уравнительный ток $I_у$, так как в результате отсутствия магнитной симметрии э. д. с. в отдельных параллельных ветвях не бывают равными.

Эти токи увеличивают потери и ухудшают коммутацию. Поэтому, как правило, для всех обмоток с $a>1$ применяют уравнительные соединения (уравнители) — внешние провода, которые соединяют точки равного потенциала. По этим проводам замыкаются уравнительные токи, минуя щеточный контакт.

Уравнительные соединения простых петлевых обмоток называют уравнительными соединениями первого рода.

Шаг уравнительных соединений — расстояние между точками присоединения уравнительных соединений

$$y_у=K/p=K/a, \qquad (2.13)$$

где K — см. § 2.2, п. 5.

Общее число уравнителей, если их присоединять к каждой коллекторной пластине,

$$N_у=K/a. \qquad (2.14а)$$

Выполнять полное число уравнителей не рекомендуется, так как возрастет длина машины. Обычно

$$N_у=(0{,}2-0{,}3)\,K/p. \qquad (2.14б)$$

Сечение провода уравнителей

$$q_у,\ мм^2=(0{,}2-0{,}5)\,q_я, \qquad (2.15)$$

где $q_я$ — см. (2.16).

Уравнительные соединения выполняют или в виде замкнутых колец (рис. 2.7, *а*), к которым штифтами подсоединяют в соответствии с шагом коллекторные пластины, или в виде дуг-секций подобно лобовым частям обмотки, подсоединенным к коллекторным пластинам (рис. 2.7, *б*). В первом случае уравнительные соедине-

ния располагают со стороны подшипника на коллекторной втулке, во втором случае — под лобовыми частями обмотки якоря. Наибольшее распространение получили уравнительные соединения выполненные в виде специальных секций.

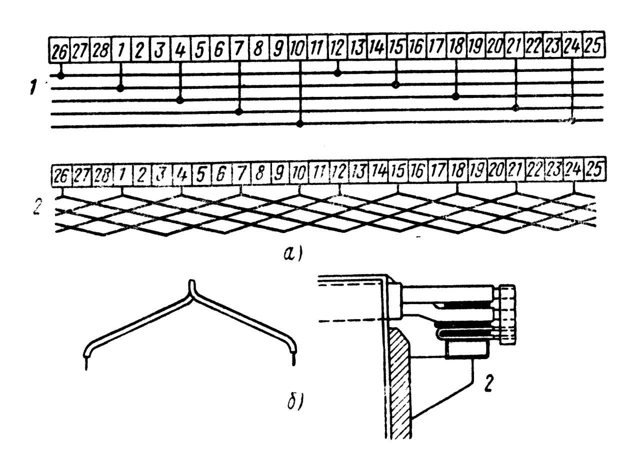


Рис. 2.7. Уравнительные соединения:

а — для обмотки по рис. 2.6, *а*: *1* — в виде замкнутых колец; *2* — в виде секций; *б*: *1* — секция; *2* — расположение секции под лобовыми частями обмотки якоря

§ 2.4. ПРОВОДА ОБМОТКИ

После выбора основных параметров обмотки определяют сечение, размеры и марку провода, размеры зубца и паза, которые позволят уложить обмотку, изоляцию и клин. При этом проверяют возможность размещения обмотки и правильность выбора $\frac{l_i}{D_я}$, Z и K.

1. *Поперечное сечение проводника* $q_я$ определяют, исходя из допустимой величины плотности тока $j_я$:

$$q_я,\ мм^2 = \frac{i_я}{j_я}, \tag{2.16}$$

где $i_я = \frac{I_я}{2a}$ — ток параллельной ветви;

$j_я$ — плотность тока якоря, $а/мм^2$.

Плотность тока $j_я$ связана с тепловой нагрузкой якоря, которая характеризуется в основном произведением линейной нагрузки на плотность тока в проводах обмотки якоря $Aj_я$ и условиями теплоотдачи. Плотность тока $j_я$ зависит от режима работы, типа исполнения, условий охлаждения, класса изоляции. Рекомендации по величине $j_я$ обычно даются в виде зависимости $Aj_я$ от параметров машины, связанных с нагревом и теплоотдачей.

Для машин открытого исполнения общего применения с нормальной скоростью вращения и изоляцией классов Е и В можно использовать зависимости $Aj_я = f(D_я)$ на рис. 2.8. Чем эффективнее теплоотвод, тем выше допустимые значения $Aj_я$. Для машин с изоляцией класса А значения $Aj_я$ на рис. 2.8 должны быть снижены на 10—15%.

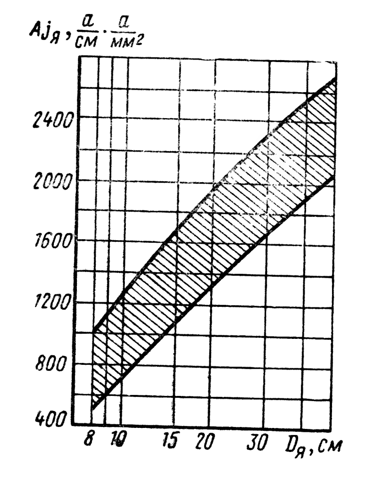


Рис. 2.8. Зависимость $Aj_я$ от диаметра якоря $D_я$

Задавшись значением $Aj_я$, из (2.7) следует взять значение A и определить плотность тока $j_я = \frac{Aj_я}{A}$.

Для маломощных машин рекомендуют пользоваться зависимостью $Aj_я = f(m_t)$, приведенной в табл. 2.3, где m_t — удельная тепловая загрузка поверхности якоря — отношение общих потерь в меди обмотки и в стали якоря к наружной цилиндрической поверхности пакета якоря.

Таблица 2.3

Скорость вращения якоря, *об/мин*	$Aj_я$ при числе полюсов	
	$2p=2$	$2p=4$
До 5000	$1700m_t$	$1300m_t$
5000—10000	$1400m_t$	$1100m_t$
10000—15000	$1200m_t$	$1000m_t$

При продолжительном режиме работы

$$m_t,\ вт/см^2 = \Theta_m \alpha (1 + 0{,}1 v_я), \qquad (2.17)$$

где Θ_m — предельное допустимое превышение температуры якоря над температурой окружающей среды; для маломощных машин принимают $\Theta_m = 65°$ С;

α — коэффициент теплоотдачи поверхности якоря в спокойной среде, равный $(1{,}4 \div 1{,}8) \cdot 10^{-3}$ *вт/(град·см²)* при закрытом исполнении машины, $(2{,}0 \div 2{,}4) \cdot 10^{-3}$ *вт/(град×см²)* при открытом исполнении;

$v_я$ — окружная скорость якоря, *м/сек*, см. (1.4).

Если использовать средние значения α, выражение (2.17) примет вид при закрытом и открытом исполнении машины соответственно:

$$m_t = 0{,}10(1+0{,}1v_я); \qquad (2.17а)$$

$$m_t = 0{,}14(1+0{,}1v_я).$$

При повторно-кратковременном режиме работы значения m_t по (2.17) или (2.17а) увеличивают на 20%.

Для машин летательных аппаратов, работающих в длительном режиме, в зависимости от интенсивности охлаждения можно принимать следующие значения плотности тока:

в машинах с продувом	$j_я = 14 \div 20$ *а/мм²*
» » самовентилируемых . .	$j_я = 6 \div 12$ *а/мм²*
с естественным охлаждением	$j_я = 2 \div 4$ *а/мм²*

При повторно-кратковременном режиме работы величины $j_я$ могут быть увеличены на 10—15%.

2. *Марки проводов.* Определив по (2.16) поперечное сечение проводника $q_я$, выбирают тип провода (прямоугольный или круглый) и его марку.

Если $q_я < 2$ *мм²*, рекомендуется круглый провод, если $q_я > 2$ *мм²* — прямоугольный. Для удобства выполнения обмотки не рекомендуются круглые провода с $q_я > 2{,}3$ *мм²*. Если по (2.16) получилось $q_я > 2{,}3$ *мм²*, следует взять два параллельных провода, каждый сечением $\frac{q_я}{2}$ (или более двух проводов).

Для машин малой и средней мощности применяют изолированные обмоточные провода с витковой изоляцией; для мощных машин — голую медь с витковой изоляцией из микаленты.

Выбор изоляционного материала провода (марки провода) имеет существенное значение, так как в пазах электрических машин медь занимает примерно 30—45% всего объема паза, остальную часть паза занимают изоляционные материалы провода, катушек и паза, воздушные прослойки и клин или бандаж. Поэтому уменьшение толщины изоляционных материалов позволяет увеличить мощность машины (или уменьшить габариты). Снизить габариты и вес машины можно путем применения более нагревостойких изоляционных материалов, так как при этом можно повысить электромагнитные нагрузки *. Характеристики основных марок изолированных обмоточных проводов приведены в приложении 6.

Классификация по нагревостойкости обмоточных проводов, номинальные размеры проводов, толщина изоляционного материала

---

* Но следует учитывать, что полностью использовать возможности нагревостойких материалов не всегда выгодно, так как при этом повышается температура нагрева машины, снижается к. п. д., ухудшаются коммутационные параметры.

и другие сведения по ГОСТам и ТУ даны в приложениях 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Наибольшее распространение получили провода следующих марок.

Провода марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-2 имеют небольшую толщину изоляции и обеспечивают поэтому высокий коэффициент использования паза. Но их изоляция недостаточно надежна механически и с точки зрения пробивного напряжения. Эти провода применяют только в маломощных машинах при напряжении до 30 *в*. При напряжении 110 *в* применяют провода ПЭЛШО, ПЭЛШКО, ПБД.

В машинах для летательных аппаратов нетеплостойкого исполнения обмотки выполняют из круглых проводов ПЭТ, ПЭТ-2 или ПЭВ-2, из прямоугольных ПЭТВ и ПЭТВП; теплостойкого исполнения — ПЭТКСОТ, ПЭТКСО, ПСДКТ.

В машинах общего применения используют провода ПЭВ-2, ПЭЛБО, ПБД, ПЭТСО, ПСД, ПДА, ПЭТКСО, ПСДК. Выбор марки провода осуществляют в зависимости от класса изоляции машины (см. приложение 6).

Размеры круглого провода следует согласовывать с ГОСТом или ТУ после выбора марки провода; размеры прямоугольного провода — после определения размеров паза.

§ 2.5. ПАЗЫ И ЗУБЦЫ ЯКОРЯ

1. Форма паза и крепление обмотки

Пазы якоря выполняют открытыми и полузакрытыми различных форм. Форму паза выбирают в зависимости от диаметра якоря и формы проводника (круглый или прямоугольный).

Открытые пазы с параллельными сторонами применяют, когда используют прямоугольные провода, что обеспечивает лучшее заполнение площади паза проводами (рис. 2.9, 2.10).

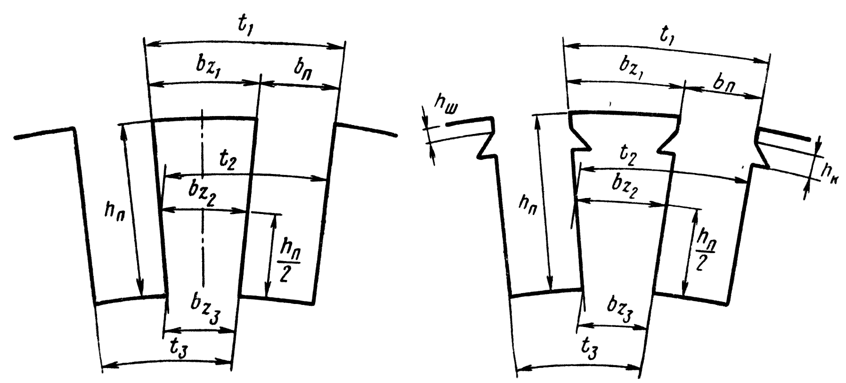


Рис. 2.9. Открытые пазы с параллельными стенками с креплением обмотки бандажом

Рис. 2.10. Открытые пазы с параллельными стенками с креплением обмотки клиньями

В открытый паз можно сразу закладывать сторону секции или катушки (катушку образуют изолированные все вместе пазовые части секций), которые заранее изготовляют на шаблоне. Это большое преимущество открытых пазов. Недостатком открытых пазов является то, что они вызывают пульсации магнитного потока в воз-

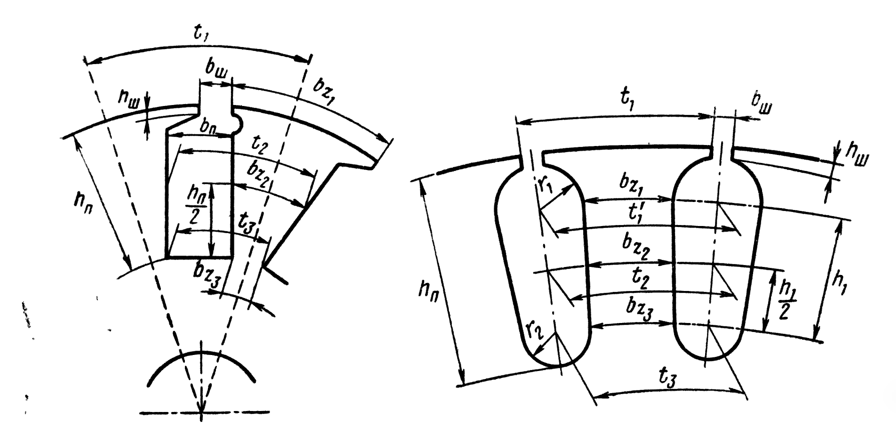


Рис. 2.11. Полузакрытые пазы с параллельными стенками с креплением обмотки клиньями

Рис. 2.12. Полузакрытые пазы овальной формы с параллельными сторонами зубцов на расстоянии h_1

душном зазоре, что приводит к потерям от вихревых токов в наконечниках главных полюсов и в проводах обмотки якоря. Однако в машинах средней и большой мощности зазор между якорем и главным полюсом имеет значительную величину, поэтому влияние пульсаций потока незначительно. Обычно с такими пазами выполняют якори машин средней и большой мощности общего применения и мощных машин для летательных аппаратов.

В машинах с компенсационной обмоткой пазы следует делать полузакрытыми, так как в этом случае воздушный зазор машины небольшой, поскольку реакция якоря отсутствует. Полузакрытые пазы с параллельными сторонами (рис. 2.11) применяют в маломощных машинах низкого напряжения, для которых используют прямоугольный провод.

Рис. 2.13. Пазы круглой формы

В машинах с небольшим диаметром якоря, для которых применяют провода круглого сечения, пазы выполняют полузакрытыми овальной формы с параллельными сторонами зубцов на расстоянии h_1 (рис. 2.12). Такая форма позволяет избежать тонких у основания

зубцов, что ослабило бы их механически и привело бы к недопустимому увеличению индукции в этих частях зубцов.

В маломощных машинах с диаметром якоря не более 4 *см* пазы выполняют круглой формы (рис. 2.13). Это упрощает изготовление штампа для якоря и снижает его стоимость.

Крепление обмотки в пазах может осуществляться бандажами (см. рис. 2.9) или клиньями (см. рис. 2.10). Использование клина уменьшает полезное сечение паза. Но в этом случае несколько уменьшаются вызываемые пульсациями магнитного поля потери от вихревых токов в верхних слоях обмотки, так как клин увеличивает воздушный зазор. Бандажи требуют меньше места в пазу, чем клинья, но создают потери от вихревых токов.

2. Размеры паза

Паз овальной формы

Сначала определяют площадь паза, которая должна обеспечить размещение проводов, пазовой изоляции, клина и изоляционных прокладок. Исходя из площади, устанавливают остальные размеры паза (см. рис. 2.12, 2.14).

а) *Площадь поперечного сечения паза, необходимая для размещения проводов*

$$S_{\text{пр·п}},\ мм^2 = \frac{\pi d_{\text{из}}^2 N_{\text{п}}}{4k_{\text{зп}}}, \tag{2.18}$$

где $d_{\text{из}}$ — диаметр изолированного провода, *мм* (см. § 2.4),
$N_{\text{п}}$ — число проводов в пазу, см. (2.8);
$k_{\text{зп}}$ — коэффициент заполнения паза изолированными проводами;

$$k_{\text{зп}} = 0{,}35 \div 0{,}70.$$

б) *Площадь пазовой изоляции, клина и изоляционных прокладок.* Изоляция электрической машины в значительной степени обеспечивает надежность работы машины и срок службы. Большое значение имеет выбор материала и размеров пазовой изоляции, клина и изоляционных прокладок. Следует учитывать электрическую, тепловую, механическую прочность изоляционных материалов. Важно правильно выбрать их конструктивную компоновку.

В машинах общего применения пазовую изоляцию разделяют на две группы: для машин с напряжением до 600 *в* и для машин с напряжени-

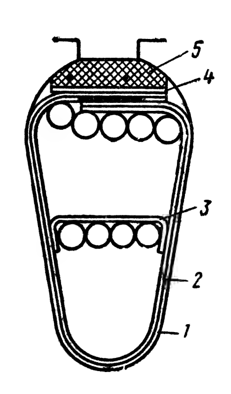


Рис. 2.14. Полузакрытый паз овальной формы с пазовой изоляцией, прокладками и клином

ем выше 600 *в*; в машинах для летательных аппаратов — с напряжением до 30 *в* и выше 30 *в*; в маломощных машинах — с напряжением 6—12; 12—30 и 110—120 *в*. В зависимости от нагревостойкости электроизоляционные материалы разделяются на 7 классов. Классификация их приведена в приложении 11.

Таблица 2.4

Позиция на рис. 2.14	Назначение	Материал		Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, *мм*
		наименование	толщина, *мм*		
		Машины общего применения напряжением до 500 *в*			
		Класс изоляции А, марки провода ПЭВ-2, ПЭЛБО, ПБД			
1	Пазовая изоляция	Картон электроизоляционный	0,20	2	0,40
2	То же	Стеклолакоткань эскапоновая	0,18	1	0,18
3	Прокладка	Картон электроизоляционный	0,20	1	0,20
4	То же	Стеклолакоткань эскапоновая	0,18	1	0,18
5	Клин	Дерево пропитанное	2	—	—
		Класс изоляции В, марки провода ПЭТСО, ПСД			
1	Пазовая изоляция	Стекломиканит гибкий	0,4	1	0,4
2	То же	Стеклолакоткань эскапоновая	0,18	1	0,18
3	Прокладка	Стекломиканит гибкий	0,4	1	0,4
4	То же	Стеклотекстолит или стекломиканит	0,5	1	0,5
5	Клин	Стеклотекстолит	3	—	—
		Класс изоляции Н, марки провода ПЭТКСО, ПСДК			
1	Пазовая изоляция	Стекломиканит	0,3	2	0,6
2	Подклейка пазовой изоляции	Стеклолакоткань	0,15	1	0,15
3	Прокладка	Стекломиканит	0,3	2	0,6
4	То же	Стеклотекстолит	0,5	1	0,5
5	Клин	То же	не менее 2	—	—
		Машины для летательных аппаратов напряжением до 30 *в*			
		Класс изоляции А, марки провода ПЭВ-2, ПЭШО			
1	Пазовая изоляция	Электрокартон	0,15	1	0,15
2	То же	То же	0,10	1	0,10
3	Прокладка	Электрокартон	0,20	1	0,20
5	Клин	Текстолит	0,5	1	0,5

На рис. 2.14 показан паз машины, цифрами обозначены пазовая изоляция, прокладки и клин. Их материал, размеры, количество указаны в табл. 2.4.

Пазы маломощных машин изолируют одним слоем кабельной бумаги или электрокартона, толщина которых зависит от напряжения машины:

при 6—12 *в*	**0,10÷0,15** *мм*
при 12—30 *в*	0,15÷0,25 *мм*
при 110—120 *в*	**0,30÷0,50** *мм*

Определяется толщина пазовой изоляции по высоте $h_{пи}$ и ширине $b_{пи}$ паза с учетом припуска на укладку.

Площадь, занимаемая пазовой изоляцией,

$$S_{пи},\ мм^2 = b_{пи}\Pi, \tag{2.19}$$

где П — периметр паза,

$$\Pi,\ мм \cong (0{,}7 \div 0{,}8) D_я 10. \tag{2.20}$$

Толщина (высота) клина рекомендуется 0,5÷5 *мм*.

в) *Общая потребная площадь паза (без шлица)*

$$S_п,\ мм^2 = S_{пр\cdot п} + S_{пи} + S_{кл} + S_{пп}, \tag{2.21}$$

где $S_{кл}$ — площадь, занимаемая клином;

$S_{пп}$ — площадь, занимаемая пазовыми прокладками.

г) *Размеры шлица*

$$\left.\begin{aligned} h_ш &= 0{,}2 \div 0{,}8\ мм; \\ b_ш &= 3 \div 5\ мм. \end{aligned}\right\} \tag{2.22}$$

д) *Размеры паза* (см. рис. 2.12)

$$r_1,\ см = \frac{\pi (D_я - 2h_ш \cdot 10^{-1}) - Zb_{Z_2}}{2(Z + \pi)}; \tag{2.23}$$

$$r_2,\ см = \sqrt{\frac{r_1^2 (Z + 5) - \pi S_п \cdot 10^{-2}}{Z - 5}}; \tag{2.24}$$

$$h_1,\ см = \frac{r_1 - r_2}{\pi} Z; \tag{2.25}$$

$$h_п,\ см = h_1 + r_1 + r_2 + h_ш 10^{-1}, \tag{2.26}$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8; Z — см. § 2.2, п. 7;

$h_ш$ — см. (2.22); $S_п$ — см. (2.21);

b_{Z_2} — ширина зубца в среднем сечении.

Величина b_{Z_2} определяется допустимой индукцией в зубце:

$$b_{Z_2},\ см = \frac{B_\delta t_1}{B_{Z_2} K_{ст}}, \tag{2.27}$$

где B_δ — см. § 1.3, п. 2;

t_1 — зубцовое деление по внешней поверхности якоря,

$$t_1 = \frac{\pi D_я}{Z}; \qquad (2.28)$$

$K_{ст}$ — коэффициент заполнения пакета якоря сталью с учетом изоляции между листами (его значения даны в табл. 2.5).

Таблица 2.5

Изоляция листов	Коэффициент заполнения пакета якоря горячекатаной сталью при толщине листа, *мм*				
	0,2	0,35	0,5	1,0	2,0
Без покрытия лаком	—	—	0,95 0,96*	0,96	0,97
При покрытии лаком	—	0,90	0,93 0,94*	—	—
При оксидировании	0,92	0,96	0,97	0,98	—

* Для холоднокатаной стали.

Для якорей в основном применяют горячекатаную сталь толщиной 0,5 *мм* марок Э11, Э12, Э13, Э21 и Э22. При повышенной частоте перемагничивания ($f > 50$ *гц*) применяют сталь Э31, Э32 и Э34. Изоляцией большей частью служит лак или эмаль.

Допустимые максимальные значения индукции в зубце B_Z для машин общего применения в зависимости от частоты перемагничивания даны в табл. 2.6, для машин летательных аппаратов в зависимости от мощности машины — в табл. 2.7. Меньшие значения (табл. 2.6 и 2.7) следует выбирать при большей частоте перемагничивания f.

Таблица 2.6

Пазы	Максимальная индукция в зубце, *тл* при частоте перемагничивания, *гц*			
	75	50	25	15
Полузакрытые B_{Z_2}	1,8—1,9	1,9—2,0	1,95—2,05	—
Открытые B_{Z_3}	1,85—2,1	2,1—2,3	до 2,4	до 2,5

Таблица 2.7

$P_н$ ($P_{2н}$), *вт*	до 100	до 1000	Свыше 1000
B_Z, *тл*	1,3—1,5	1,5—1,8	1,8—2,1

Паз прямоугольной формы

а) *Высотой паза* $h_п$ предварительно задаются. Для машин общего применения и для летательных аппаратов $h_п$ можно выбирать в зависимости от диаметра якоря $D_я$ по кривой 2.15, для маломощных машин на основании опыта проектирования можно принимать

$$h_п,\ см = (0{,}25 - 0{,}35)\, D_я. \quad (2.29)$$

б) *Общую толщину изоляции* по высоте ($h_{пи}$) и ширине ($b_{пи}$) паза определяют в зависимости от класса изоляции (об изоляционных материалах см. далее «Паз овальной формы»).

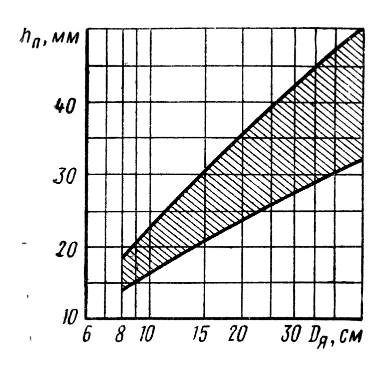


Рис. 2.15. Зависимость высоты паза $h_п$ от диаметра якоря $D_я$ для машин общего применения и летательных аппаратов

На рис. 2.16, *а*, *б*, *в* показаны прямоугольные пазы машин общего применения с изоляцией и прокладками, материал и размеры которых даны в табл. 2.8.

а)

б)

в)

Рис. 2.16. Открытый паз прямоугольной формы машины общего применения с пазовой изоляцией и прокладками; изоляции класса *а — А*; *б — В*; *в — Н*

Таблица 2.8

Позиция на рис. 2.16	Материал: Наименование	Материал: Толщина, мм	Количество слоев	Толщина материала в пазу, мм: по высоте при числе витков в секции якоря 1	2	3	4	по ширине
	Класс изоляции А, напряжение до 600 в							
	Толщина изоляции одной катушки (без междувитковой)							
1	Электроизоляционный картон пропитанный	0,2	1 вразбежку	—	0,2	0,4	0,6	—
2	Бумага телефонная лакированная	0,05	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	Микабумага	0,2	$2\frac{1}{4}$ оборота впритык	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0
4	Лента миткалевая пропитанная	0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Припуск на разбухание изоляции			0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
	Итого			1,6	1,8	2,0	2,2	1,7
	Полная толщина изоляции паза							
	Толщина изоляции катушек			3,2	3,6	4,0	4,4	1,7
5	Электроизоляционный картон пропитанный	0,2	1	0,2	0.2	0,2	0,2	0,4
6	То же	0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	—
	Допуск на укладку			0,5	0,5	0,5	0,5	0,3
	Итого			4,3	4,7	5,1	5,5	2,4
	Толщина изоляции лобовой части одной катушки							
7	Лента миткалевая пропитанная	0,2	впритык 1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
8	Лента из лакошелка	0,1	вполнахлеста 1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
9	Лента миткалевая пропитанная	0,2	вполнахлеста 1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Припуск на разбухание изоляции			0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Итого			2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Позиция на рис. 2,16	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев	Толщина материала в пазу, *мм*: по высоте при числе витков в секции якоря 1	2	3	4	по ширине 1	2	3	4
Класс изоляции В, напряжение до 600 *в*											
Изоляция одной катушки (без междувитковой)											
1	Стекломикалента	0,17	1	—	0,17	0,34	0,51	—			
2	Стекломиканит	0,25	$2\frac{1}{4}$ оборота	1,0	1,0	1,0	1,0	1,25			
3	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
	Припуск на разбухание изоляции			0,3	0,3	0,3	0,3	0,2			
	Итого			1,7	1,87	2,04	2,21	1,85			
Полная толщина изоляции паза											
	Толщина изоляции катушек			3,4	3,74	4,08	4,42	1,85			
4	Прокладка из гибкого стекломиканита	0,3	1	0,6	0,6	0,6	0,6	—			
	Допуск на укладку			0,5	0,5	0,5	0,5	0,3			
	Итого			4,5	4,84	5,18	5,52	2,15			
Толщина изоляции лобовой части одной катушки											
5	Стекломикалента	0,17	1 вполнахлеста	0,68	0,68	0,68	1,36	0,68			
6	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
	Припуск на разбухание изоляции			0,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
	Итого			1,48	1,48	1,48	2,16	1,48			
Класс изоляции Н, напряжение до 600 *в* *											
Толщина изоляции одной катушки (без междувитковой)											
1	Стекломикалента	0,17	1	—	0,17	0,34	0,51	—	—	—	—
	Подмазка проводников лаком	0,05	—	0,1	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,25
2	Стекломикалента	0,17	2 вполнахлеста	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36

Позиция на рис. 2.16	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев	Толщина материала в пазу, *мм*: по высоте при числе витков в секции якоря: 1	2	3	4	по ширине			
3	Лента стеклянная	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Припуск на разбухание изоляции			0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
	Итого			1,96	2,13	2,35	2,57	1,86	1,91	1,96	2,01
	Полная толщина изоляции паза										
4	Толщина изоляции катушек			3,92	4,26	4,70	5,14	1,86	1,91	1,96	2,01
	Прокладка из гибкого стекломиканита	0,5	1	1,0	1,0	1,0	1,0	—	—	—	—
	Допуск на укладку			0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
	Итого			5,42	5,76	6,20	6,64	2,16	2,21	2,26	2,31
	Толщина изоляции лобовой части одной катушки										
	Подмазка проводников лаком	0,05		0,1	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,2
5	Стекломикалента	0,15	1 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Припуск на разбухание изоляции			0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
	Итого			1,5	1,5	1,55	1,6	1,4	1,45	1,5	1,55

* Виток состоит из двух параллельных проводов, расположенных по высоте.

Прямоугольные пазы маломощных машин изолируются так же, как и овальные.

В табл. 2.9 указаны материалы и толщина изоляции прямоугольного паза машин для летательных аппаратов, напряжением до 30 *в* в зависимости от класса изоляции.

Крепление обмотки машин с диаметром якоря до 40 *см* при окружной скорости якоря до 35 *м/сек* осуществляется бандажом. Высота канавки предварительно принимается $h_к = 2 \div 5$ *мм*. Если крепление осуществляется клином, его высота $h_{кл} = 0{,}5 \div 5$ *мм*.

Позиция на рис. 2.17	Назначение	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев
Класс изоляции А, марки провода ПЭВП, ПЭВ-2				
1	Клин	Текстолит	0,5	1
2	Изоляция паза	Электрокартон	0,15	1
3	То же	То же	0,10	1
5	Прокладка	Стекломиканит	0,20	1
6	Провод обмоточный			
Класс изоляции В, марки провода ПЭТВ, ПЭТВП				
1	Клин	Стеклотекстолит	0,5	1
2	Изоляция паза	Стеклослюдинит формовочный	0,15	1
3	То же	Стеклослюдинит гибкий	0,1	1
5	Прокладка	Стекломиканит	0,2	1
6	Провод обмоточный			
Класс изоляции Н, марки провода ПЭТКСОТ, ПЭТКСО, ПСДКТ				
1	Клин	Стеклотекстолит	0,5	1
2	Изоляция паза	Стеклослюдинит формовочный	0,1÷0,15	1
3	То же	Стеклослюдинит гибкий	0,1	1
4	То же	Фторопласт	0,04	1
5	Прокладка	Стекломиканит	0,2	1
6	Провод обмоточный			

в) *Общая высота проводников*, определяемая предварительно,

$$h_{м1},\ мм = h_{п}\cdot 10 - h_{из} - h_{к}. \tag{2.30}$$

Так как по высоте укладываются два слоя проводов, высота одного эффективного проводника

$$h_{м},\ мм = \frac{h_{м1}}{2}. \tag{2.30а}$$

При этом для мощных машин высота проводника с целью ограничения потерь на вихревые токи должна иметь определенный предел.

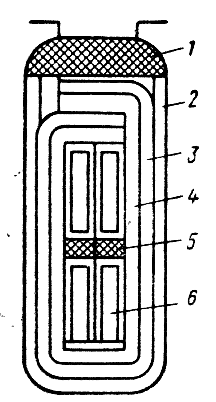


Рис. 2.17. Полузакрытый паз прямоугольной формы машины для летательных аппаратов напряжением 30 *в* с изоляцией, прокладками и клином

Рекомендуемые предельные значения высоты паза $h_п$ и высоты элементарного проводника $h_м$ даны в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Частота *f*, *гц*	75	60	50	40	30	20	15 и менее
Высота паза $h_п$, *мм*	35	40	43	48	52	56	65
Высота элементарного проводника $h_м$, *мм*	5,1	6,4	7,4	8,6	9,3	10,8	12,5

Если $h_м$ получается выше рекомендуемой в табл. 2.10 при $w_{ся}=1$, активные проводники следует разделить по высоте на два элементарных. Тогда по высоте паза будут расположены 4 элементарных проводника ($u_в=4$). Полученную высоту проводника округляют до ближайшего значения стандартной величины (см. приложение 9).

г) *Ширина проводника*

$$b_м,\ мм=\frac{q_я}{h_м}. \tag{2.31}$$

Полученную ширину проводника $b_м$ округляют до стандартной (см. приложение 9).

Соотношение сторон прямоугольного провода рекомендуется

$$2{,}5<\frac{h_м}{b_м}<5{,}5.$$

д) *Размеры паза* в собранном сердечнике («в свету»):
ширина

$$b'_п,\ мм=u_п b_м+b_{из}; \tag{2.32}$$

высота

$$h'_п,\ мм=u_в h_м+h_{из}+h_к. \tag{2.33}$$

Размеры паза на отдельном листе («в штампе»), из которого собирается пакет якоря, должны быть больше на величину припуска на штамповку, $\Delta_ш=0{,}15—0{,}20$ *мм*. При этом
ширина

$$b_п,\ мм=b'_п+\Delta_ш; \tag{2.32а}$$

высота

$$h_п,\ мм=h'_п+\Delta_ш. \tag{2.33а}$$

После выбора размеров паза необходимо проверить минимальное сечение зубца (для прямоугольного паза это сечение в основании зубца) по условиям механической прочности и допустимой величине индукции. Для машин большой и средней мощности минимальная по условиям прочности ширина зубца у основания $b_{Z_{min}} \geqslant 2$ *мм*, для маломощных — $b_{Z_{min}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ *мм*.

Индукция в минимальном сечении зубца

$$B_{Z_{max}} = \frac{B_\delta t_1}{K_{ст} b_{Z_{min}}}. \tag{2.34}$$

Здесь B_δ — см. § 1.3, п. 2; $K_{ст}$ — см. табл. 2.5; t_1 — см. (2.28);

$$b_{Z_{min}},\ см = t_3 - b_п \cdot 10^{-1}, \tag{2.35}$$

где $b_п$ — см. (2.32а)

t_3 — зубцовый шаг по основанию зубцов,

$$t_3,\ см = \frac{\pi (D_я - 2h_п \cdot 10^{-1})}{Z}. \tag{2.36}$$

В (2.36) $D_я$ — см. § 1.3, п. 8; $h_п$ — см. (2.33а); Z — см. § 2.2, п. 7.

Величина $B_{Z_{max}}$ по (2.34) не должна превышать значений в табл. 2.6, 2.7 более чем на 5—10%.

Паз круглой формы

а) *Диаметр паза* круглой формы определяется величиной площади, необходимой для размещения изолированных проводов обмотки якоря, изоляции и клина

$$d_п,\ мм = \sqrt{\frac{4S_п}{\pi}}, \tag{2.37}$$

$$S_п,\ мм^2 = S_{пр\cdot п} + S_{из} + S_к.$$

$S_{пр.п}$, $S_{из}$ и $S_к$ — определяются так же, как и в случае, когда паз имеет овальную форму.

б) *Высота паза*

$$h_п,\ мм = d_п + h_ш, \tag{2.38}$$

где $d_п$ — см. (2.37); $h_ш$ — см. (2.22).

После выбора размеров паза проверяют минимальное сечение зубца по условиям механической прочности и допускаемой величине магнитной индукции по (2.34), при этом минимальная ширина зубца равна

$$b_{Z_2},\ мм = b_{Z_{min}} = \frac{\pi (D_я \cdot 10 - h_п)}{Z} - d_п, \tag{2.39}$$

где $d_п$ — см. (2.37); $h_п$ — см. (2.38).

Паз, если предусматривается скос пазов

Как указывалось ранее, для снижения пульсаций главного потока благодаря зубчатости якоря применяют скос пазов на $(0{,}5 \div 1{,}0)\,t_1$. В случае, если делается скос пазов якоря на одно пазовое деление t_1, при любой форме паза имеем:

а) площадь паза

$$S_{\text{п·ск}},\ мм^2 = \frac{S_{\text{п}}}{\cos\gamma}; \tag{2.40}$$

б) ширину паза

$$b_{\text{п·ск}},\ мм = \frac{b_{\text{п}}}{\cos\gamma}; \tag{2.41}$$

в) диаметр паза

$$d_{\text{п·ск}},\ мм = \frac{d_{\text{п}}}{\sqrt{\cos\gamma}}. \tag{2.42}$$

В (2.40)—(2.42)

$$\cos\gamma = \frac{l_{\text{я}}}{\sqrt{l_{\text{я}}^2 + t_1^2}};$$

$d_{\text{п}}$ — см. (2.37); $l_{\text{я}}$ — см. § 1.3, п. 8; t_1 — см. (2.28).

3. Размеры зубца

Паз овальной формы (рис. 2.12)

Шаг в расчетном сечении

$$t_2,\ см = \frac{\pi\left[D_{\text{я}} - 2\left(h_{\text{ш}}\cdot 10^{-1} + r_1 + \frac{h_1}{2}\right)\right]}{Z}, \tag{2.43}$$

где $D_{\text{я}}$ — см. § 1.3, п. 8; $h_{\text{ш}}$ — см. (2.22);
r_1 — см. (2.23); h_1 — см. (2.25);
Z — см. § 2.2, п. 7.

Ширина зубца в расчетном сечении

$$\left.\begin{aligned} b_{Z_1},\ см &= b_{Z_2} = b_{Z_3};\\ b_{Z_2},\ см &= t_2 - (r_1 + r_2), \end{aligned}\right\} \tag{2.44}$$

где t_2 — см. (2.43), r_1 и r_2 — см. (2.23) и (2.24).

Паз прямоугольной формы (рис. 2.9—2.11)

Шаги в расчетных сечениях
t_1 — см. (2.28); t_3 — см. (2.36);

$$t_2,\ см = \frac{\pi D_{\text{я}} - h_{\text{п}}\cdot 10^{-1}}{Z}; \tag{2.45}$$

где $h_{\text{п}}$ — см. (2.33а).

Ширина зубца в расчетных сечениях

$$b_{Z_1},\ см = t_1 - b_п \cdot 10^{-1}; \quad (2.46)$$

$$b_{Z_2},\ см = t_2 - b_п \cdot 10^{-1}; \quad (2.47)$$

$$b_{Z_3},\ см = t_3 - b_п \cdot 10^{-1}, \quad (2.48)$$

где t_1, t_2, t_3 — см. (2.28), (2.45), (2.36); $b_п$ — см. (2.32).

Паз круглой формы (рис. 2.13)

Шаги в расчетных сечениях: t_1 — см. (2.28); t_2 — см. (2.45); t_3 — см. (2.36).

В (2.45) и (2.36) $h_п$ определяется по (2.38).

Ширина зубца в расчетных сечениях

b_{Z_1} — см. (2.44), (2.46);

b_{Z_2} — см. (2.39);

b_{Z_3} — см. (2.48).

§ 2.6. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ВЕС ОБМОТКИ

Сопротивление обмотки якоря в холодном состоянии при температуре окружающей среды $t = 20°$ С определяется по формуле

$$R_я,\ ом = \frac{L_{мя}}{5700 q_я (2a)^2}. \quad (2.49)$$

Здесь $q_я$ — см. (2.16); $2a$ — см. § 2.2, п. 1.

$L_{мя}$ — полная длина проводников обмотки якоря;

$$L_{мя},\ см = N_я l_{ср.я}, \quad (2.50)$$

где $N_я$ — см. (2.2);

$l_{ср.я}$ — средняя длина полувитка обмотки якоря, *см*;

$$l_{ср\ я},\ см = l_я + l_{лоб.я}, \quad (2.51)$$

где $l_я$ — см. § 1.4;

$l_{лоб.я}$ — длина лобовой части обмотки.

а) Для обмоток с полузакрытым пазом

$$\left.\begin{array}{ll} \text{при } 2p = 2 & \\ & l_{лоб.я},\ см = (0{,}75 \div 0{,}9)\tau; \\ \text{при } 2p = 4 & \\ & l_{лоб.я},\ см = (1{,}0 \div 1{,}2)\tau. \end{array}\right\} \quad (2.52а)$$

б) Для обмоток с открытым пазом

$$l_{лоб.я},\ см = (1,2 \div 1,4)\tau, \qquad (2.52б)$$

где τ — см. (1.13).

Большие значения коэффициентов перед τ соответствуют машинам с большим диаметром якоря $D_я$.

Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии

$$R_{ян},\ ом = mR_я, \qquad (2.53)$$

где m — коэффициент увеличения сопротивления при нагреве сверх 20° С. Его значения в зависимости от температуры перегрева даны в табл. 2.11.

Таблица 2.11

θ° С	55	60	65	70	75	80	85	90	95
m	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,33	1,36	1,38

Расчетная рабочая температура нагрева для классов изоляции А, Е и В принимается 75° С, для классов изоляции F и Н — 115° С.

Вес меди обмотки якоря

$$G_{мя},\ н = 87L_{мя}q_я \cdot 10^{-5}, \qquad (2.54)$$

где $L_{мя}$ — см. (2.50); $q_я$ — см. (2.16).

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

§ 3.1. РАЗМЕРЫ МАГНИТОПРОВОДА

Для того чтобы рассчитать магнитную цепь машины, прежде всего необходимо определить размеры всех частей ее магнитопровода.

Поперечные разрезы магнитопроводов машин постоянного тока показаны на рис. 3.1, *а*, *б*.

Основными размерами магнитопровода являются:

а) сечение S_Z, высота h_Z и ширина b_Z зубца в расчетных сечениях якоря;

б) сечение $S_я$ и высота $h_я$ спинки якоря;

в) длина воздушного зазора между главным полюсом и якорем δ;

г) сечение $S_г$, высота $h_г$ и ширина $b_г$ главного полюса;

д) ширина $b_{гн}$, длина $l_{гн}$ и высота $h_{гн}$ наконечника главного полюса;

е) длина воздушного зазора между главным полюсом и станиной $\delta_{гс}$;

ж) сечение $S_с$, длина $l_с$ и высота $h_с$ станины.

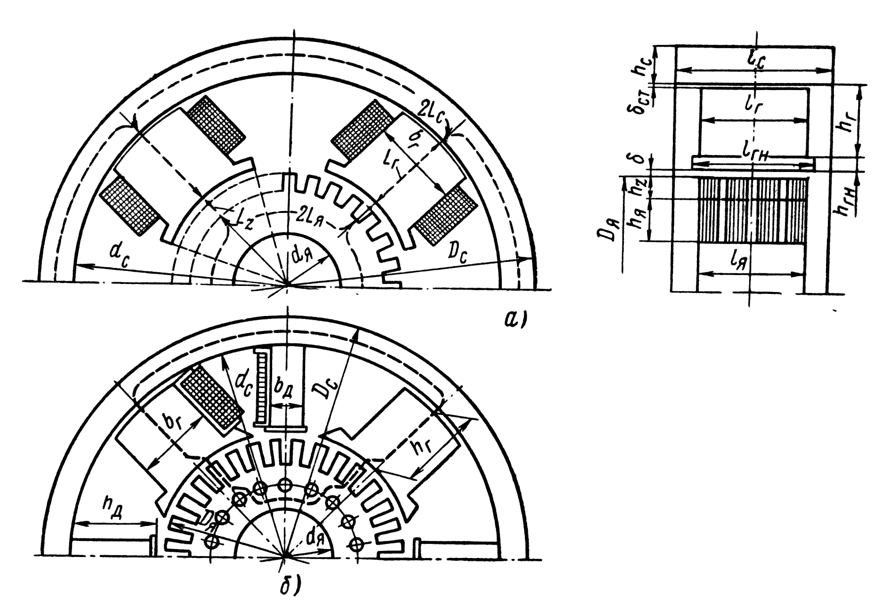


Рис. 3.1. Поперечные разрезы магнитопроводов машин постоянного тока: *а* — без добавочных полюсов; *б* — с добавочными полюсами

а. Якорь

Якорь машин постоянного тока выполняют из листовой электротехнической стали толщиной $\Delta_я = 0{,}2 \div 1{,}0$ *мм*. Толщину листа выбирают в зависимости от частоты перемагничивания: при $f \leqslant 50$ *гц* применяют сталь толщиной 0,5 *мм*, при $f > 50$ до 1000 *гц* — толщиной 0,35 *мм* и при $f > 1000$ *гц* — толщиной 0,2 *мм*. Большей частью используют горячекатаную электротехническую сталь марок Э11, Э12, Э13, Э21 и Э22. При повышенной частоте перемагничивания ($f > 50$ *гц*) применяют сталь Э31 и Э32.

б. Зубцы якоря

Паз овальной формы

Высота зубца равна высоте паза $h_Z = h_п$ и

$$h_Z,\ см = h_1 + r_1 + r_2 + h_ш \cdot 10^{-1}, \qquad (3.1)$$

где h_1, r_1, r_2, $h_ш$ — см. (2.25), (2.23), (2.24), (2.22).

Ширина зубца в расчетном сечении b_{Z_2} — см. (2.44).

Расчетное сечение зубца

$$S_{Z_2},\ см^2 = b_{Z_2} l K_{ст}, \tag{3.2}$$

где $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.; b_{Z_2} — см. (2.44);

l — длина всех пакетов якоря без радиальных каналов, *см.*

При отсутствии радиальных каналов $l = l_я$, где $l_я$ — см. § 1.3, п. 8.

При наличии радиальных каналов $l = l_я - n_р b_р$, где $n_р b_р$ — см. (1.12б).

Паз прямоугольной формы

Высота зубца $h_Z = h_п$, где $h_п$ — см. (2.33а).

Ширина зубца в расчетных сечениях b_{Z_1}, b_{Z_2}, b_{Z_3} — см. (2.46), (2.47), (2.48).

Расчетные сечения зубца

$$S_{Z_1},\ см^2 = \frac{b_{Z_1}}{b_{Z_3}} S_{Z_3}; \tag{3.3}$$

$$S_{Z_2},\ см^2 = \frac{b_{Z_2}}{b_{Z_3}} S_{Z_3}; \tag{3.4}$$

$$S_{Z_3},\ см^2 = b_{Z_3} l K_{ст}, \tag{3.5}$$

где l — см. (3.2); $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

Паз круглой формы

Высота зубца

$$h_Z,\ см = h_п = (d_п + h_ш)\,10^{-1}, \tag{3.6}$$

где $d_п$ — см. (2.37), $h_ш$ — см. (2.22).

Ширина зубца в расчетном сечении b_{Z_2} — см. (2.39).

Расчетное сечение зубца

$$S_{Z_2},\ см^2 = b_{Z_2} l K_{ст}, \tag{3.7}$$

где l — см. (3.2); $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

в. Спинка якоря

Высота спинки якоря

$$h_я,\ см = \frac{D_я - (2h_п + d_я)}{2}, \tag{3.8}$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8; $h_п$ — см. (2.26), (2.33а), (2.38);

$d_я$ — внутренний диаметр якоря.

Обычно в машинах общего применения с $D_я \leqslant 50$ *см*, в электродвигателях для летательных аппаратов мощностью $P_{2н} \leqslant 500$ *вт* и в маломощных машинах внутренний диаметр якоря равен диаметру вала; $d_я = d_в$.

Предварительно внутренний диаметр якоря таких машин можно определить по следующим формулам.

Для машин общего применения с $D_я = (5 \div 50)$ *см*

$$d_я,\ см = d_в = K_в \sqrt[3]{\frac{P_н}{n}}, \tag{3.9}$$

где $P_н$ — номинальная мощность (указывается в задании), *квт*;
n — скорость вращения (указывается в задании), *об/мин*;
$K_в$ — коэффициент, значения которого даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$D_я$, *см*	5	10	20	30	40	50
$K_в$	35	32	27	24,5	23	21,5

Для машин летательных аппаратов с $D_я < 5$ *см* и маломощных

$$d_я,\ см = d_в = 32 \sqrt[3]{\frac{P_н}{n}}, \tag{3.10}$$

где $P_н$ в *квт*.

В машинах для летательных аппаратов мощностью выше 500 *вт* обычно $d_я > d_в$. Для них можно определить по рис. 3.2 $d_в$ в зависимости от внешнего диаметра якоря $D_я$ и выбрать $d_я$ таким образом, чтобы в машинах с аксиальной системой охлаждения можно было разместить вентиляционные каналы. У машин с естественным охлаждением эти каналы служат для уменьшения веса машины.

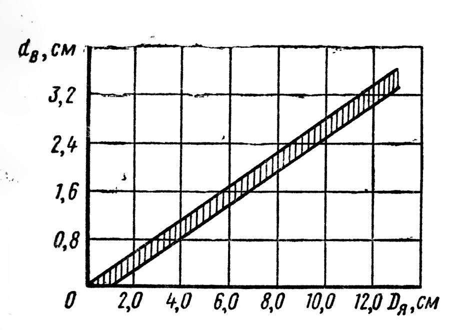


Рис. 3.2. Зависимость внутреннего диаметра якоря $d_я = d_в$ от внешнего $D_я$ для машин летательных аппаратов

Сечение спинки якоря без аксиальных каналов

$$S_я = h_я l K_{ст}. \tag{3.11а}$$

Сечение спинки якоря при наличии одного или двух рядов аксиальных каналов

$$S_я,\ см^2 = \left(h_я - \frac{2}{3} d_а\right) l K_{ст}, \tag{3.11б}$$

где $K_{ст}$ — см. табл. 2.5; $h_я$ — см. (3.8); l — см. (3.2);

$d_а$ — диаметр аксиального канала; $d_а \approx 1,4 \div 2,5$ *см* в зависимости от диаметра якоря.

Высоту спинки якоря $h_я$, полученную из (3.8), необходимо проверить по допустимой величине индукции в спинке якоря:

$$B_я,\ тл = \frac{\Phi_я}{2S_я} \cdot 10^4. \qquad (3.12)$$

Здесь

$$\Phi_я,\ вб = \alpha_i \tau l_i B_\delta \cdot 10^{-4}, \qquad (3.13)$$

где α_i — см. § 1.3, п. 3; τ — см. (1.13);

l_i — см. § 1.3, п. 8; B_δ — см. § 1. 3, п. 2,

Допускаемые значения $B_я$ в машинах общего назначения в зависимости от частоты перемагничивания f даны в табл. 3.2.

Таблица 3.2

f, *гц*	75	50	25	15 и ниже
$B_я$, *тл*	0,8—1,0	1,1—1,25	1,3—1,4	1,4—1,5

В машинах для летательных аппаратов допускаются более высокие значения магнитной индукции $B_я$ в зависимости от мощности машины $P_н$ (см. табл. 3.3). Для маломощных машин допускается $B_я = 1,3 \div 1,5$ *тл*.

Таблица 3.3

$P_н$, *вт*	до 100	100—1000	свыше 1000
$B_я$, *тл*	1,0—1,3	1,3—1,5	1,5—1,7

Если $B_я$ по (3.12) не превосходит допускаемых значений, можно считать, что $h_я$, а следовательно, и $d_я$ предварительно выбраны правильно. В противном случае эти размеры следует пересмотреть, задавшись допустимыми значениями $B_я$ и по формулам (3.12) и (3.11) найти высоту спинки $h_я$ по условиям насыщения.

г. Воздушный зазор между главным полюсом и якорем

Величина воздушного зазора между главным полюсом и якорем δ существенно влияет на характеристики и размеры машины.

С одной стороны целесообразно уменьшать воздушный зазор, в результате чего снижается м. д. с. воздушного зазора, доля которой в общей м. д. с. значительна (от 40 до 70%). При этом уменьшаются размеры машины, так как для размещения обмотки главных полюсов требуется меньшая площадь (окно), что позволяет умень-

шить высоту главного полюса, а следовательно, и диаметр станины. Уменьшаются также потери в обмотке возбуждения.

Но при малом воздушном зазоре δ поле машины при колебаниях нагрузки меняется по своей величине, что отрицательно сказывается на коммутации и приводит к неустойчивой работе машины. Поэтому при выборе δ исходят из условия, чтобы поле под полюсной дугой при нагрузке не меняло своего направления (не опрокидывалось). Это условие можно выразить следующим образом:

для некомпенсированных машин общего применения с добавочными полюсами

$$\frac{F_\delta + F_Z}{0{,}5 A b_{\text{гн}}} \geqslant 1; \qquad (3.14)$$

для машин без добавочных полюсов

$$\frac{F_\delta + F_Z}{0{,}5 A b_{\text{гн}}} \geqslant 1{,}3; \qquad (3.15)$$

для компенсированных машин (с компенсационной обмоткой)

$$\frac{F_\delta + F_Z}{0{,}5 A b_{\text{гн}}} \geqslant 0{,}75, \qquad (3.16)$$

где F_δ — м. д. с. воздушного зазора на один полюс;
F_Z — м. д. с. зубцов на один полюс;
A — см. (2.7), $b_{\text{гн}}$ — см. (1.14а и 1.14б).

Обычно

$$F_Z = (0{,}2 \div 0{,}5) F_\delta, \qquad (3.17)$$

а так как

$$F_\delta,\ a = 0{,}8 K_\delta \delta B_\delta \cdot 10^4, \qquad (3.18)$$

где $K_\delta = 1{,}05 \div 1{,}25$ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления вследствие зубчатости якоря,

из условий (3.14) — (3.16) можно получить соответственно значения воздушного зазора:

для некомпенсированных машин с добавочными полюсами

$$\delta,\ см \geqslant (0{,}7 \div 0{,}5) \frac{A b_{\text{гн}}}{B_\delta} \cdot 10^{-4}; \qquad (3.19)$$

для машин без добавочных полюсов

$$\delta,\ см \geqslant (0{,}9 \div 0{,}65) \frac{A b_{\text{гн}}}{B_\delta} \cdot 10^{-4}; \qquad (3.20)$$

для компенсированных машин

$$\delta,\ см \geqslant (0{,}5 \div 0{,}37) \frac{A b_{\text{гн}}}{B_\delta} \cdot 10^{-4}; \qquad (3.21)$$

для машин летательных аппаратов с добавочными полюсами

$$\delta,\ см = (0{,}4 \div 0{,}25)\frac{Ab_{гн}}{B_\delta}\cdot 10^{-4}. \qquad (3.22)$$

Для электродвигателей летательных аппаратов без добавочных полюсов, работающих без регулятора скорости вращения, при повторно-кратковременном и кратковременном режимах «опрокидывание» поля влияет на работу электродвигателя менее существенно. Поэтому можно воздушный зазор принимать меньше, чем по (3.22), исходя только из технологических и механических ограничений.

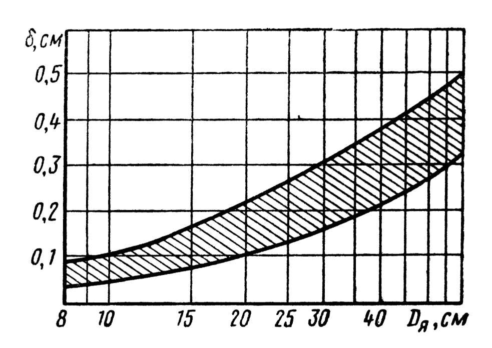


Рис. 3.3. Зависимость воздушного зазора δ между главным полюсом и якорем от диаметра якоря $D_я$ для машин общего применения

Как правило, машины общего применения и для летательных аппаратов изготавливают с добавочными полюсами, компенсационные обмотки применяют реже (см. гл. IV).

Маломощные машины выполняются без добавочных полюсов и компенсационной обмотки. Для маломощных электродвигателей

$$\delta,\ см = (0{,}4 \div 0{,}25)\frac{Ab_{гн}}{B_\delta}\cdot 10^{-4}; \qquad (3.23)$$

для генераторов

$$\delta,\ см = 0{,}65\frac{Ab_{гн}}{B_\delta}\cdot 10^{-4}. \qquad (3.24)$$

Меньшие значения рекомендуют для электродвигателей кратковременного режима работы.

Предварительно δ целесообразно выбирать по кривым или таблицам, составленным на основе опыта проектирования. Для машин общего применения зависимость $\delta = f(D_я)$ дана на рис. 3.3. У машин с большим отношением $\frac{l_i}{D_я}$ воздушный зазор должен быть больше, им соответствует верхняя кривая.

Для машин летательных аппаратов δ целесообразно выбирать по значениям в табл. 3.4.

В компенсированных машинах края полюса приподнимают, и воздушный зазор у краев полюсного наконечника увеличивается примерно вдвое. Постоянная величина зазора сохраняется на расстоянии $(0{,}6 \div 0{,}7)\ b_{гн}$.

Таблица 3.4

Электродвигатели				
$P_{2н}$, *квт*	до 0,1	0,1—1,0	1,0—10,0	10,0—30,0
δ, *мм*	0,15—0,20	0,25—0,35	0,35—0,80	0,6—1,0

Генераторы				
$P_{н}$, *квт*	до 6,0	9—12	18—24	—
δ, *мм*	0,5	0,5—0,6	0,7	—

д. Сердечник главного полюса

Порядок определения размеров сердечника главного полюса следующий.

Сечение сердечника полюса определяют по допустимой индукции в сердечнике $B_г$:

$$S_г,\ см^2 = \frac{\sigma \Phi_я}{B_г} \cdot 10^4, \qquad (3.25)$$

где σ — коэффициент рассеяния главных полюсов; обычно $\sigma = 1,15 \div 1,25$ (большие значения относятся к машинам с большим числом полюсов);

$\Phi_я$ — см. (3.13);

$B_г$ — индукция в сердечнике главного полюса.

Допустимое значение $B_г$ зависит от марки стали сердечника. Обычно полюсы выполняют или шихтованными из листов электротехнической стали марок Э11, Э12, Э310, Э330, или целыми литыми из сталей тех же марок. Сердечник и полюсные наконечники штампуются заодно.

В маломощных машинах иногда полюсные листы штампуют вместе со станиной.

Допускаемые значения $B_г$ для машин общего применения приведены в табл. 3.5, для машин летательных аппаратов — в табл. 3.6, для маломощных $B_г = 1,0 \div 1,3$ *тл*.

Таблица 3.5

Марка стали	$B_г$, *тл*
Э11, Э12	1,30—1,55
Э310, Э330	1,45—1,75

Таблица 3.6

$P_н$, *вт*	до 100	100—1000	свыше 1000
$B_г$, *тл*	1,0—1,2	1,2—1,4	1,4—1,7

Длина сердечника полюса по оси $l_г$ обычно принимается равной длине якоря $l_я$ или менее ее на 0,1—0,5 *см*. Длину сердечника уменьшают для снижения торцевого рассеяния и уменьшения средней длины витка обмотки возбуждения

$$\left.\begin{aligned} l_г, \ см &= l_я; \\ l_г, \ см &= l_я - (0{,}1 \div 0{,}5), \end{aligned}\right\} \qquad (3.26)$$

где $l_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4.

Ширина сердечника полюса определяется из площади сечения сердечника

$$b_г = \frac{S_г}{l_г K_{ст}}, \qquad (3.27)$$

$K_{ст}$ — для шихтованных полюсов см. табл. 2.5.

$S_г$ — см. (3.25), $l_г$ — см. (3.26).

Высоту полюса $h_г$ определяют до разработки конструкции, предварительно; ее можно находить по кривой рис. 3.4 или по приближенной зависимости

$$h_г, \ см \cong (1{,}0 \div 1{,}3)\, b_г, \qquad (3.28)$$

где $b_г$ — см. (3.27).

Окончательно $h_г$ устанавливается согласно конструктивным возможностям размещения обмотки возбуждения.

е. Наконечник главного полюса

Ширина полюсного наконечника (рис. 3.5)

$$\left.\begin{aligned} b_{гн} &= b_{i\,гн} - 2\delta; \\ &\text{для маломощных машин} \\ b_{гн} &= (1{,}02 \div 1{,}03)\, b_{i\,гн} \end{aligned}\right\} \qquad (3.29)$$

где $b_{iгн}$ — см. (1.15), δ — см. § 3.1., п. г.

Длина полюсного наконечника по оси $l_{гн}$ обычно равна длине якоря

$$l_{гн} = l_я, \qquad (3.30)$$

где l — см. § 1.3, п. 8, § 1.4.

Высота $h_{гн}$ полюсного наконечника (рис. 3.5) выбирается такой, чтобы сечение не было чрезмерно насыщено:

$$h_{гн} = \frac{B_\delta}{B_{гн}} \cdot \frac{b_{гн} - b_г}{2 K_{ст}}, \tag{3.31}$$

где B_δ — см. § 1.3, п. 2 и § 1.4;

$b_{гн}$ — см. (3.29), $b_г$ — см. (3.27), $B_{гн} = 1{,}8 \div 2{,}0$ *тл.* — индукция в наконечнике полюса, $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

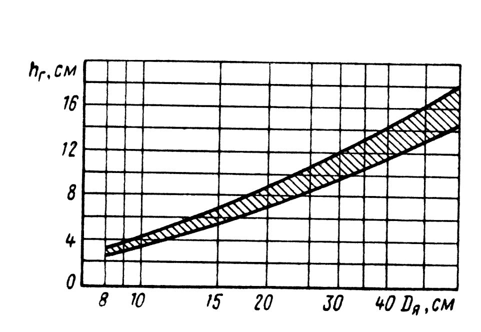


Рис. 3.4. Зависимость высоты полюса $h_г$ от диаметра якоря $D_я$

Рис. 3.5. Наконечник главного полюса

Ширина выступа (рис. 3.5)

$$b_{гв} = (0{,}15 \div 0{,}2)\, b_г.$$

Ширину выступа $b_{гв}$ следует выбирать минимально допустимой, исходя из условий крепления обмотки возбуждения.

ж. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной

Если главные полюсы штампуются не целиком со станиной, при сборке между ними не обеспечивается плотное прилегание, вследствие чего создается участок с добавочным сопротивлением для магнитного потока.

Эквивалентный зазор можно оценить соотношением

$$\delta_{гс},\ см = 2 l_г \cdot 10^{-4} + 0{,}01, \tag{3.32}$$

где $l_г$ — см. (3.26).

Индукция в зазоре стыка

$$B_{ст} = B_г,$$

где $B_г$ — см. табл. 3.4 и 3.5.

з. Станина

Станина машины постоянного тока является одновременно корпусом и активной частью, проводящей магнитный поток. Как правило, станины изготовляют из сталей. Они выполняются или литыми (в виде стальных отливок) или сварными (ГОСТ 977—53, марки сталей 15 л, 20 л, ..., 50 л). Для станин используется и стальной прокат (марки стали ст. 1, ст. 2, ст. 3), который обладает преимуществом перед литой сталью, так как не имеет неизбежных при литье раковин. В небольших машинах общего применения (до 0,25 *квт*), работающих с частыми остановками, с переменной нагрузкой станины изготавливают из листовой стали.

Станины маломощных машин иногда изготавливают шихтованными из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 или 1,0 *мм*.

Сечение станины $S_с$ выбирают по допустимой индукции в станине $B_с$:

$$S_с,\ см^2 = \frac{\sigma \Phi_я}{2B_с} \cdot 10^4, \qquad (3.33)$$

где $\sigma = 1{,}15—1{,}25$; $\Phi_я$ — см. (3.13).

Допустимая индукция обычно $B_с = 1{,}0—1{,}4$ *тл*, меньшие значения относятся к машинам меньшей мощности. Для машин мощностью до 1 *квт* $B_с = 1{,}1—1{,}25$, свыше 1 *квт* $B_с = 1{,}25—1{,}4$ *тл*.

Длина станины (см. рис. 3.1)

$$l_с,\ см = l_г + (0{,}5 \div 0{,}7)\tau, \qquad (3.34)$$

где $l_г$ — см. (3.26); τ — см. (1.13)

Высота станины

$$\left.\begin{array}{ll} \text{сварная} & h_с,\ см = \dfrac{S_с}{l_с}; \\ \text{литая} & h_с,\ см = \dfrac{S_с}{0{,}97 l_с}; \\ \text{шихтованная} & h_с = \dfrac{S_с}{K_{ст} l_с}, \end{array}\right\} \qquad (3.35)$$

где $S_с$ — см. (3.33); $l_с$ — см. (3.34); $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

Коэффициент 0,97 в (3.35) учитывает возможность наличия раковин в литье.

Внутренний диаметр станины

$$d_с,\ см = D_я + 2(h_г + h_{гн}) + (2 \div 3)\delta, \qquad (3.36)$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; $h_г$ — см. (3.28); $h_{гн}$ — см. (3.31); δ — см. § 3.1, п. г.

Коэффициент (2÷3) в (3.36) учитывает наличие прокладок между полюсами и станиной, с помощью которых осуществляют регулировку воздушного зазора между якорем и полюсами.

Внешний диаметр станины

$$D_c,\ см = d_c + 2h_c, \tag{3.37}$$

где d_c — см. (3.36), размер его определяется за счет изменения $h_г$;
h_c — см. (3.35).

После округления размеров уточняются величины сечения S_c и индукции B_c.

§ 3.2. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи состоит в нахождении м. д. с. на отдельных участках магнитной цепи с целью определения суммарной м. д. с. на полюс F_Σ. Эта м. д. с. необходима для образования потока возбуждения $\Phi_я$, который обеспечивает наведение в обмотке якоря э. д. с. заданной величины.

Для расчета вычерчивается эскиз поперечного сечения магнитной системы машины. Можно ограничиться частью системы в пределах одной пары полюсов (см. рис. 3.1).

Порядок расчета

1. Магнитную цепь разбивают на участки:
1) зубцы якоря;
2) воздушный зазор между главным полюсом и якорем;
3) спинка якоря;
4) сердечник главного полюса;
5) наконечник главного полюса;
6) воздушный зазор между главным полюсом и станиной;
7) станина.
2. Определяют магнитный поток якоря на полюс:

$$\Phi_{ян},\ вб = \frac{60aE_н}{n_н p N_я}, \tag{3.38}$$

где a — см. § 2.2, п. 1; $n_н$ — см. задание;
p — см. § 1.5, п. 1; $N_я$ — см. (2.2).

Точное значение э. д. с. $E_н$ можно подсчитать только после определения сопротивлений последовательно включенных в цепь якоря обмоток добавочных полюсов, компенсационной обмотки и последовательной обмотки возбуждения.

Для машин параллельного и смешанного возбуждения без добавочных полюсов и компенсационной обмотки э. д. с. можно подсчитать на данном этапе. При смешанном возбуждении нужно только предварительно определить сопротивление последовательной обмотки в нагретом состоянии, что можно сделать с небольшим приближением, так как сопротивление такой обмотки незначительное.

В этих случаях уточненное значение э. д. с.:

$$\left.\begin{aligned} &\text{для генераторов} && E_н = U_н + \Delta U_н; \\ &\text{для электродвигателей} && E_н = U_н - \Delta U_н. \end{aligned}\right\} \tag{3.39}$$

Здесь $\Delta U_н$ — падение напряжения в цепи якоря при номинальной нагрузке в нагретом состоянии;

при параллельном возбуждении $\Delta U_н = I_я R_{ян} + \Delta U_щ$

при смешанном возбуждении (см. рис. 3.7, *г*)

$$\Delta U_н = I_я R_{ян} + I_я R_{сн} + \Delta U_щ,$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $R_{ян}$ — см. (2.3);

$\Delta U_щ$ — падение напряжения в переходном контакте щеток, *в*, см. (4.73).

Для других машин окончательное определение э. д. с. $E_н$ можно произвести только после расчета обмоток главных и добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

Предварительно можно принять, что потери в обмотках цепи якоря и в контакте щеток составляют в среднем 50% суммы потерь машины. Тогда падение напряжения в цепи якоря

$$\Delta U_н,\ в = U_н \frac{100 - \eta}{200}. \quad (3.40)$$

Отсюда э. д. с. электродвигателя

$$E_н,\ в = U_н \left(0,5 + \frac{\eta}{200}\right); \quad (3.41а)$$

э. д. с. генератора

$$E_н,\ в = U_н \left(1,5 - \frac{\eta}{200}\right), \quad (3.41б)$$

где η — см. § 1.4, п. 6.

3. Определяют магнитную индукцию на участке магнитопровода

$$B_x = \frac{\Phi_x}{S_x},$$

где S_x — сечение данного участка.

4. По кривой намагничивания $B = f(H)$ (см. приложение 12) для выбранного материала данного участка находят значение напряженности магнитного поля H.

5. Определяют м. д. с. участка на один полюс

$$F_x = L_x H_x,$$

где L_x — длина магнитной силовой линии на участке (длина участка).

Длина магнитных силовых линий участков магнитопровода:

1) зубцов якоря

$$L_Z,\ см = h_п, \quad (3.42)$$

где $h_п$ — см. (2.26), (2.29), (2.33), (2.38);

2) спинки якоря

$$L_я,\ см = \frac{\pi (d_я + h_я)}{4p} + \frac{h_я}{2}, \qquad (3.43)$$

где $d_я$ — см. § 3.1, п. б; $h_я$ — см. (3.8); p — см. § 1.5, п. 1;

3) сердечника главного полюса (обычно сердечник и наконечник главного полюса рассматривают, как один участок)

$$L_г,\ см = h_г + h_{гн}, \qquad (3.44)$$

где $h_г$ — см. (3.28); $h_{гн}$ — см. (3.31);

4) станины

$$L_c,\ см = \frac{\pi}{4p}(D_c - h_c) + \frac{h_c}{2}, \qquad (3.45)$$

где D_c — см. (3.37), h_c — см. (3.35).

Целесообразно расчет магнитной цепи свести в табл. 3.7.

Для построения характеристик намагничивания машины и переходной (см. рис. 3.6) в табл. 3.7 рассчитываются значения всех величин, соответствующих $E = 0{,}5\ E_н$, $E = 0{,}8\ E_н$, $E = E_н$, $E = 1{,}1\ E_н$, $E = 1{,}15\ E_н$.

Пояснения к таблице 3.7

1. При определении напряженности магнитного поля зубца следует учитывать следующее.

Если в машине общего применения или для летательных аппаратов с открытыми пазами $B_{Z_3} > 1{,}8$ *тл*, действительные значения индукции зубца будут меньше расчетных B_{Z_1}, B_{Z_2}, B_{Z_3}, так как часть потока в этом случае проходит по воздуху через паз.

Поэтому напряженность магнитного поля H для листовой электротехнической стали Э11, Э12, и Э21 следует определять по кривым приложения *13а*, стали марки Э31 — по кривым приложения *13б* в зависимости от значений коэффициентов вытеснения потока c_Z:

$$c_{Z_1} = \frac{t_1}{b_{Z_1}} \cdot \frac{l_я}{lK_{ст}};\quad c_{Z_2} = \frac{t_2}{b_{Z_2}} \cdot \frac{l_я}{lK_{ст}};\quad c_{Z_3} = \frac{t_3}{b_{Z_3}} \cdot \frac{l_я}{lK_{ст}}, \qquad (3.46)$$

где t_1, t_2, t_3 — см. (2.28), (2.36), (2.43), (2.45);
b_{Z_1}, b_{Z_2}, b_{Z_3} — см. (2.44), (2.46), (2.47), (2.48), (2.35).
$l_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; l — см. § 3.1, (3.2).
$K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

Расчетное значение $H_{Z_{ср}}$ в случае открытых пазов определяют по формуле

$$H_{Z_{ср}} = \frac{H_{Z_1} + 4H_{Z_2} + H_{Z_3}}{6}. \qquad (3.47)$$

Таблица 3.7

№ пп.	Величина	Расчетная формула	$E=0{,}5E_н$	$E=0{,}85E_н$	$E=E_н$	$E=1{,}1E_н$	$E=1{,}15E_н$
1	Магнитный поток	$\Phi_я = \frac{60aE}{npN_я}$					
2	Индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \frac{\Phi_я}{\alpha_i \tau l_i} \cdot 10^4$					
3	М. д. с. воздушного зазора	$F_\delta = 0{,}8K_\delta \delta B_\delta \cdot 10^4$					
4	Индукция в зубце	$B_{Z_1} = K_{Z_1} B_\delta$					
5	То же	$B_{Z_2} = K_{Z_2} B_\delta$					
6	»	$B_{Z_3} = K_{Z_3} B_\delta$					
7	Напряженность магнитного поля в зубце	H_{Z_1}					
8	То же	H_{Z_2}					
9	»	H_{Z_3}					
10	Средняя напряженность магнитного поля в зубце	$H_{Z_{ср}} = \frac{H_{Z_1} + 4H_{Z_2} + H_{Z_3}}{6}$					
11	М. д. с. зубца	$F_Z = L_Z H_{Z_{ср}}$					
12	Индукция в спинке якоря	$B_я = \frac{\Phi_я}{2h_я l K_{ст}} \cdot 10^4$ или $B_я = \frac{\Phi_я 10^4}{2\left(h_я - \frac{2}{3} d_а\right) l K_{ст}}$					
13	Напряженность магнитного поля в спинке якоря	$H_я$					
14	М. д. с. спинки якоря	$F_я = L_я H_я$					
15	Магнитный поток в главном полюсе	$\Phi_г = \sigma \Phi_я$					
16	Индукция в сердечнике главного полюса	$B_г = \frac{\Phi_г}{b_г l_г K_{ст}} \cdot 10^4$					
17	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	$H_г$					
18	М. д. с. сердечника главного полюса	$F_г = L_г H_г$					
19	М. д. с. стыка	$F_{ст} = 0{,}8\delta_{ст} B_г \cdot 10^4$					
20	Индукция в станине	$B_с = \frac{\Phi_г}{2h_с l_с} \cdot 10^4$					

№ пп.	Величина	Расчетная формула	$E=0,5E_н$	$E=0,85E_н$	$E=E_н$	$E=1,1E_н$	$E=1,15E_н$
21	Напряженность магнитного поля в станине	$H_с$					
22	М. д. с. станины	$F_с=L_сH_с$					
23	Суммарная м. д. с.	$F_\Sigma=\sum F_x$					
24	М. д. с. переходного слоя	$F_{\delta+Z}=F_\delta+F_Z$					

Если $B_{Z_2}\leqslant 1,8$ *тл*, значение H_Z можно определить по индукции B_{Z_2} в среднем сечении согласно приложению *12*.

Для полузакрытых пазов H_Z определяют по индукции B_{Z_2}: если $B_{Z_2}\leqslant 1,8$ *тл*, H_Z берут из приложения *12*, если $B_{Z_2}>$ $>1,8$ *тл* — из приложения *13а* или *13б* с учетом коэффициента c_{Z_2} по (3. 46).

2. В табл. 3.7 индукция в зубце B_Z выражена через индукцию B_δ и коэффициент K_Z, где

$$K_{Z_1}=\frac{t_1}{b_{Z_1}}\cdot\frac{l_я}{lK_{ст}};\ K_{Z_2}=\frac{t_1}{b_{Z_2}}\cdot\frac{l_я}{lK_{ст}};\ K_{Z_3}=\frac{t_1}{b_{Z_3}}\cdot\frac{l_я}{lK_{ст}}. \quad (3.48)$$

3. В табл. 3.7, п. 3 K_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора зубчатого якоря по сравнению с гладким якорем;

$$K_\delta=\frac{t_1+10\delta}{t_1-b_ш+10\delta}, \quad (3.49)$$

где t_1 — см. (2.28); δ — см. § 3.1, п. г; $b_ш$ — см. (2.22).

По данным табл. 3.7 строят характеристику холостого хода машины $E=f(F_\Sigma)$ или характеристики намагничивания $B_\delta=f(F_\Sigma)$ и переходную $B_\delta=f(F_{\delta+Z})$ (см. рис. 3.6).

§ 3.3. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Прежде чем приступить к расчету обмоток возбуждения, необходимо определить, каким образом обеспечивается возбуждение машины, т. е. знать систему возбуждения. Система возбуждения часто оговаривается в техническом задании на проектирование, но этот вопрос может решать и проектировщик.

В машинах постоянного тока применяют следующие системы возбуждения (см. рис. 3.7):

1) независимую с постоянными магнитами;
2) независимую от постороннего источника;

3) последовательную;

4) параллельную;

5) смешанную компаундную (последовательная обмотка включена согласно с параллельной);

6) смешанную противокомпаундную.

Независимое возбуждение с постоянными магнитами применяют только в микродвигателях (для снижения потерь).

Независимое возбуждение от постороннего источника применяют для генераторов и электродвигателей, когда требуется большой диапазон регулирования напряжения или скорости вращения.

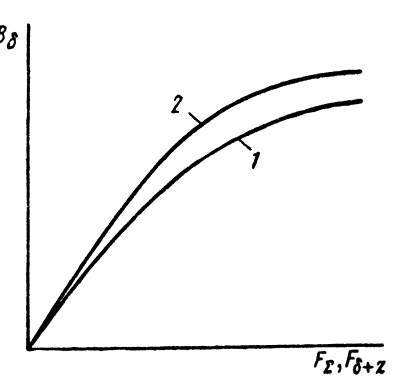


Рис. 3.6. Характеристики:
1 — намагничивания $B_\delta=f(F_\Sigma)$; 2 — переходная $B_\delta=f(F_{\delta+Z})$

Последовательное возбуждение используют в электродвигателях в тех случаях, когда при изменении момента нагрузки можно допускать большие колебания скорости вращения, требуется большой пусковой вращающий момент и необходимо реверсирование.

Параллельное возбуждение выбирают для электродвигателей, у которых при изменении момента нагрузки требуется обеспечить постоянство скорости вращения установки, когда нет резких колебаний момента, требуется небольшой пусковой момент и не нужно реверсирование.

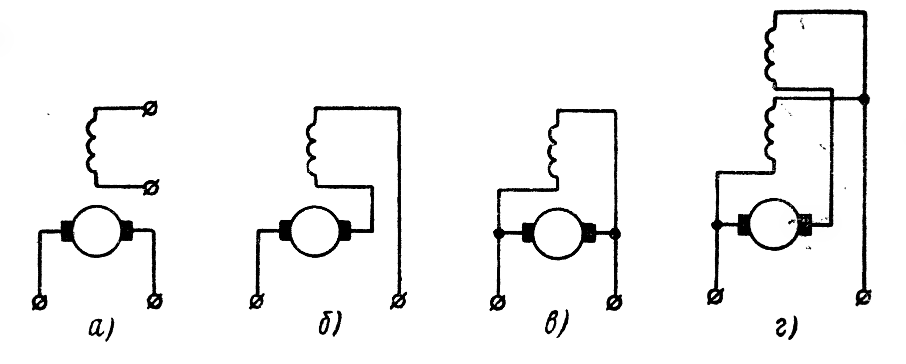


Рис. 3.7. Схемы машин постоянного тока при различном возбуждении:
а — независимом; *б* — последовательном; *в* — параллельном; *г* — смешанном

Смешанное компаундное возбуждение применяют для генераторов, когда требуется при изменении нагрузки обеспечить практически постоянное напряжение, для электродвигателей с широким диапазоном регулирования скорости вращения, когда не требуется реверсирование.

Смешанное противокомпаундное возбуждение используют для генераторов, работающих в системе Г—Д, особенно при питании реверсивных электродвигателей, так как в этом случае не требуются переключения в цепи якорного тока.

В машинах для летательных аппаратов в основном применяют две системы возбуждения: последовательную и параллельную, реже смешанную. С параллельной системой возбуждения выполняют большинство электродвигателей длительного режима работы и электродвигатели повторно-кратковременного режима, если требуется жесткая механическая характеристика. Генераторы изготавливают с параллельной системой возбуждения. Электродвигатели повторно-кратковременного режима чаще всего выполняют с последовательной системой возбуждения. Самолетные генераторы, применяемые в качестве стартеров (генераторы ГСР-СТ), имеют наряду с параллельной последовательную обмотку, используемую только в стартерном режиме.

Для маломощных электродвигателей в основном применяют последовательное возбуждение, так как в большинстве случаев требуется высокая кратность пускового вращающего момента. Параллельное возбуждение используют реже, когда необходимо обеспечить постоянство скорости вращения. В некоторых случаях возбуждение осуществляется постоянными магнитами.

§ 3.4. М. Д. С. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ

Реакция якоря

При нагрузке машины следует учитывать влияние на поле главных полюсов поля якоря, которое называют реакцией якоря.

Обмотка возбуждения должна обеспечить м. д. с., необходимую для наведения заданной э. д. с., и скомпенсировать размагничивающее действие м. д. с. реакции якоря, которая возникает при нагрузке машины, если машина насыщена. Таким образом, при нагрузке м. д. с. обмотки возбуждения должна быть

$$F_{в}=F_{\Sigma}+F_{яр}, \qquad (3.50)$$

где F_{Σ} — часть м. д. с. обмотки возбуждения, соответствующая э. д. с. при нагрузке;

$F_{яр}$ — часть м. д. с. обмотки возбуждения, необходимая для компенсации размагничивающего действия реакции якоря.

Если щетки установлены на линии геометрической нейтрали, поле якоря направлено перпендикулярно главному полю. Такое поле называют поперечным, а его воздействие — *поперечной реакцией якоря.*

Это поле якоря размагничивает один край полюса (набегающий — генератора и сбегающий — электродвигателя) и подмагничивает другой (сбегающий генератора и набегающий электродвигателя).

Если щетки сдвинуты с линии геометрической нейтрали на некоторый угол, поле якоря располагается несимметрично относительно поля главных полюсов. После разложения его на две взаимно перпендикулярные системы получается поле, направленное перпендикулярно полю полюсов, называемое поперечным, и поле, направленное вдоль поля полюсов, которое называют продольным, а его воздействие *продольной реакцией якоря.*

Если щетки сдвинуты против направления вращения у электродвигателя и по направлению вращения у генератора, продольная реакция является размагничивающей, в противном случае — намагничивающей,

М. д. с. поперечной реакции якоря

Так как м. д. с. якоря затрачивается в основном на преодоление магнитного сопротивления воздушного зазора и зубцов якоря, ее определяют по переходной характеристике

$$B_\delta = f(F_{\delta+z}),$$

где $F_{\delta+z}$ — сумма м. д. с. воздушного зазора и зубцов на полюс (рис. 3.8, табл. 3.7).

Для того чтобы определить величину м. д. с. поперечной реакции якоря, поступают следующим образом.

На переходной характеристике находят точку a, соответствующую индукции в воздушном зазоре B_δ при номинальном режиме работы. От этой точки влево и вправо откладывают отрезки, равные $0{,}5\,Ab_{i\,\text{гн}}$ и проводят две вертикальные прямые ce и fh. Площадь S_{ecgh} пропорциональна потоку при холостом ходе, площадь S_{edfh} — потоку при нагрузке. Тогда площадь S_{acd} представляет собой уменьшение за счет действия поперечной реакции якоря потока при нагрузке под набегающим краем полюса, а площадь S_{afg} — увеличение потока под сбегающим краем.

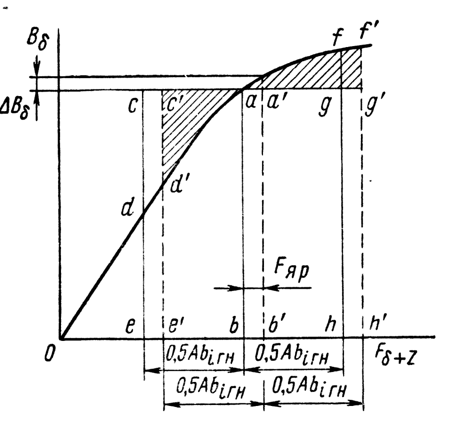


Рис. 3.8. К определению $F_{\text{яр}}$ поперечной реакции якоря

Если машина не насыщена (переходная характеристика $B_\delta = f(F_{\delta+z})$ — прямая линия), то $S_{afg} = S_{acd}$. В этом случае поток при переходе от холостого хода к нагруженному состоянию не изменяется и размагничивающее действие поперечной реакции якоря равно нулю.

Если машина насыщена, то $S_{acd} > S_{afg}$ и результирующий поток при нагрузке меньше потока при холостом ходе — при нагрузке проявляется размагничивающее действие поперечной реакции яко-

ря, которое можно определить следующим геометрическим построением. Передвигая вправо параллельно оси вертикальные линии *ce* и *fh* так, чтобы расстояние *eh* сохранилось, добиваются, чтобы площади $S_{ac'd'}$ и $S_{af'g'}$ стали равными. Тогда отрезок bb' будет соответствовать м. д. с. размагничивающей поперечной реакции якоря:

$$F_{яр} = F_{яп} = bb'. \quad (3.51)$$

Эту м. д. с. следует добавить к м. д. с. обмотки возбуждения при холостом ходе, чтобы обеспечить при нагрузке тот же магнитный поток, что и при холостом ходе, если щетки стоят на линии геометрической нейтрали.

М. д. с. продольной реакции якоря

Если щетки сдвинуты с линии геометрической нейтрали на некоторый угол α или соответственно по окружности якоря на *b см*, возникает продольная реакция якоря. Так как сдвигу щеток на 1 *см* соответствует м. д. с., равная *A*, то при сдвиге щеток на *b см*, м. д. с. продольной реакции якоря на один плюс

$$F_{яр}^{\cdot} = F_{я\,пр}^{\cdot} = Ab. \quad (3.52)$$

Если щетки сдвинуты на максимальное значение $b = \frac{\tau}{2}$, будет только одна продольная м. д. с. реакции якоря. При таком положении машина не сможет работать, так как э. д. с. между щетками и момент вращения будут равны нулю.

Максимальное значение м. д. с. поперечной реакции якоря при сдвинутых на *b см* щетках

$$F_{яп} = A\left(\frac{\tau}{2} - b\right). \quad (3.53а)$$

Если щетки стоят на линии геометрической нейтрали ($b=0$), максимальное значение поперечной реакции якоря на один плюс

$$F_{яр} = F_{яп} = A\frac{\tau}{2}. \quad (3.53б)$$

Полная м. д. с. возбуждения на один полюс при нагрузке

$$F_{в} = F_{\Sigma} + F_{яп} \pm F_{япр}^{-}. \quad (3.54)$$

Знак «плюс» перед $F_{япр}$ ставят в случае, когда реакция якоря размагничивающая, знак «минус» — подмагничивающая.

Размагничивающее действие реакции якоря вызывает неустойчивость напряжения генератора при изменениях нагрузки, а в электродвигателях — неустойчивость скорости вращения. Кроме того, увеличивается напряжение между соседними коллекторными пла-

стинами, что может вызвать увеличение искрения и образование кругового огня на коллекторе. В настоящее время сдвиг щеток не имеет практического применения.

§ 3.5. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА И ЕЕ РАСЧЕТ

С целью уничтожения вредных воздействий поперечной реакции якоря применяют компенсационную обмотку.

Компенсационная обмотка, как правило, используется в машинах общего применения с $\frac{P_{2н}}{n} \geqslant 0{,}2$ *квт об/мин*, которые должны работать с большими скоростями и перегрузками, и в машинах с $P_{2н} > 1000$ *квт*, а также в мощных авиационных стартер-генераторах с широким диапазоном изменения скорости вращения и нагрузки.

Компенсационную обмотку располагают в пазах полюсных наконечников главных полюсов и включают последовательно с обмоткой якоря и обмоткой дополнительных полюсов так, чтобы ее м. д. с. была направлена навстречу м. д. с. обмотки якоря.

Пазы изготавливают прямоугольными, полузакрытыми (см. рис. 3.9). (Круглые пазы не применяются.) В машинах средней мощности обмотки не крепят клиньями, в машинах для летательных аппаратов и в мощных (здесь не рассматриваются) компенсационные обмотки дополнительно крепятся клиньями.

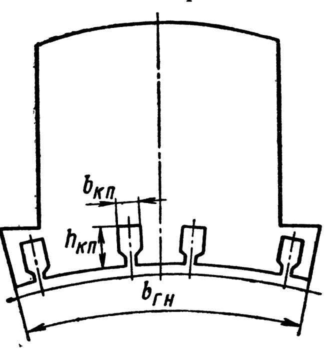


Рис. 3.9. Главный полюс с пазами для компенсационной стержневой обмотки

Чаще всего обмотку выполняют из медных стержней марки МГТ, а соединительные дуги — марки МГМ. Стержни изолируют микафолием толщиной 0,15 *мм*. Для устранения механических повреждений стержней при укладке в пазы их обертывают пропитанным электрокартоном толщиной 0,1—0,2 *мм*. Если в паз укладывают несколько стержней (что бывает редко), каждый из них дополнительно изолируют одним слоем микаленты толщиной 0,13 *мм*. Толщина изоляции одинакова для напряжения до 1000 *в*. Дуги не изолируют.

Расчет стержневой компенсационной обмотки

1. Число эффективных проводов (стержней) в пазу принимаем $N_{кп} = 1$.

2. Число пазов на полюс

$$Z_к = \frac{F_к a_к}{I_я}. \quad (3.55)$$

Здесь $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б);

$a_к$ — число параллельных ветвей компенсационной обмотки, которое обычно выбирают кратным числу пар полюсов p;

$F_к$ — м. д. с. компенсационной обмотки; ее определяют из условия степени компенсации $\theta = \frac{F_к}{F'_{яп}} \cdot 100\%$, где $F_{яп}'$ — м. д. с. поперечной реакции якоря на полюсную дугу $b_{гн}$.

Компенсация тем полнее, чем больше м. д. с. компенсационной обмотки $F_к$ приближается к $F_{яп}'$ или линейная нагрузка компенсационной обмотки $A_к$ — к линейной нагрузке якоря $A_я$. Поэтому желательно, чтобы м. д. с. компенсационной обмотки

$$F_к \cong \frac{1}{2} A b_{гн} \approx F'_{яп}, \tag{3.56а}$$

где $b_{гн}$ — см. (3.29); A — см. (2.7).

Так как по конструктивным и технологическим условиям соотношение (3.56а) не удается выполнить полностью, стремятся, чтобы

$$F_к = (0{,}85 \div 1{,}15) \cdot \frac{1}{2} A b_{гн}; \tag{3.56б}$$

3. Сечение стержня

$$q_{кс},\ мм^2 = \frac{I_я}{a_к j_{кс}}, \tag{3.57}$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б), $a_к$ — см. (3.55);

$j_{кс}$ — плотность тока в стержне компенсационной обмотки.

Для машин общего назначения

$$j_{кс} = 3{,}5 \div 4{,}0\ а/мм^2;$$

для машин летательных аппаратов с продувом

$$j_{кс} = 12 \div 15\ а/мм^2.$$

4. Высоту $h_{кс}$ и ширину $b_{кс}$ стержня (см. рис. 3.9) можно выбрать, определив $q_{кс} = h_{кс} b_{кс}$ и учитывая следующее. Высота стержня зависит от высоты паза $h_{кп}$, которую стремятся сделать небольшой, чтобы не вызвать увеличения габаритов машины. Высоту паза $h_{кп}$ не рекомендуется выполнять более 30 *мм*. Ширина паза $b_{кп}$ должна быть такой величины, чтобы индукция в зубце паза $B_{Zк} \leqslant 0{,}19$ *тл*. Размеры стержня $h_{кс}$ и $b_{кс}$ следует согласовывать с ГОСТом (см. приложение 7).

5. Длина стержня (см. рис. 3.10)

$$l_{кс},\ см \cong l_г + 2(b_{кг} + b_{кл}) \cdot 10^{-1}, \tag{3.58}$$

где $l_г$ — см. (3.26);

$b_{кг}$ — расстояние между полюсным наконечником и дугой;

$b_{кд}$ — ширина (большой размер) соединительной дуги. Предварительно можно принять:

$$b_{кг} = 11 \div 12 \ мм;$$

$$b_{кд} = 1{,}25 h_{кс} \ мм.$$

6. Длина всех стержней

$$L_{кс}, \ см = 2pN_{к}l_{кс}. \tag{3.59}$$

Здесь $2p$ — см. § 1.5, п. 1; $l_{кс}$ — см. (3.58); $N_{к} = N_{кп}Z_{к}$ — число стержней на полюс,

где $Z_{к}$ — см. (3.55).

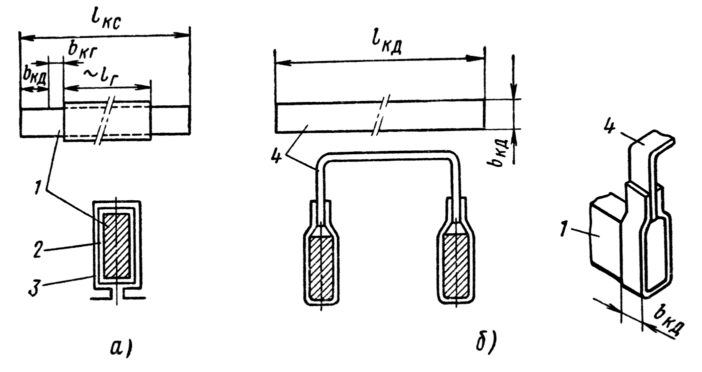


Рис. 3.10. Стержневая компенсационная обмотка:

а — элементы обмотки; *б* — паяное с хомутиком соединение элементов компенсационной обмотки; *1* — стержень; *2* — изоляция стержня; *3* — обкладка паза; *4* — соединительная дуга

7. Сечение дуг (см. рис. 3.10)

$$q_{кд}, \ мм^2 = \frac{I_{я}}{a_{к} j_{кд}}, \tag{3.60}$$

где $I_{я}$ — см. (1.8а), (1.8б); $a_{к}$ — см. (3.55);

$j_{кд}$ — плотность тока в дуге,

$$j_{кд} = (0{,}75 \div 0{,}85)\, j_{кс}, \ а/мм^2.$$

Бóльшая величина относится к машинам с бóльшими значениями A и B_{δ}.

Меньший размер соединительной дуги

$$a_{кд}, \ мм = \frac{q_{кд}}{b_{кд}}, \tag{3.61}$$

где $b_{кд}$ — см. (3.58); $q_{кд}$ — см. (3.60).

8. Длина всех дуг

$$L_{кд}, \ см = 2pN_{к}l_{кд}, \tag{3.62}$$

где $N_к$ — см. в (3.59);

$l_{кд} = 1{,}2\tau$ — средняя длина соединительной дуги между двумя стержнями.

9. Сопротивление компенсационной обмотки при температуре окружающей среды 20° С

$$R_к,\ ом = \frac{1}{5700 a_к^2} \cdot \left(\frac{L_{кс}}{q_{кс}} + \frac{L_{кд}}{q_{кд}} \right), \qquad (3.63)$$

где $a_к$ — см. (3.55); $L_{кс}$ — см. (3.59); $q_{кс}$ — см. (3.57); $L_{кд}$ — см. (3.62); $q_{кд}$ — см. (3.60).

10. Сопротивление компенсационной обмотки в нагретом состоянии

$$R_{кн} = mR_к, \qquad (3.64)$$

где m — см. табл. 2.11, $R_к$ — см. (3.63).

11. Вес меди стержней

$$G_{мкс},\ н = 87 L_{кс} q_{кс} \cdot 10^{-5}, \qquad (3.65)$$

где $L_{кс}$ — см. (3.59); $q_{кс}$ — см. (3.57).

12. Вес меди дуг

$$G_{мкд},\ н = 87 L_{кд} q_{кд} \cdot 10^{-5}, \qquad (3.66)$$

где $L_{кд}$ — см. (3.62); $q_{кд}$ — см. (3.60).

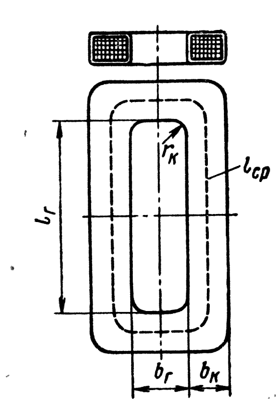


Рис. 3.11. К определению средней длины витка катушки возбуждения

§ 3.6. РАСЧЕТ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Параллельные обмотки возбуждения изготавливают в виде одной катушки на полюс (рис. 3.12, *а*) или в виде нескольких отдельных катушек, которые соединяют между собой (секционированные катушки, рис. 3.12, *б*). У секционированных катушек для образования между ними вентиляционных каналов ставят дистанционные колодки или изоляционные шайбы высотой в 1 *см*.

Последовательные обмотки возбуждения выполняют только в виде одной общей катушки.

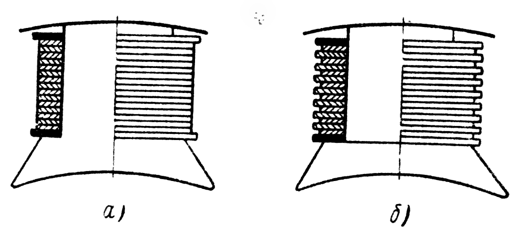


Рис. 3.12. Катушки возбуждения главных полюсов:

а — сплошная; *б* — секционированная

Если сечение провода машин общего применения $q < 10$ *мм*² и машин для летательных аппаратов $q < 2$ *мм*², провод выбирают круглым, если соответственно $q \geqslant 10$ *мм*² и $q \geqslant 2$ *мм*² — прямоугольным.

Наиболее употребительны для машин общего применения медные эмалированные провода марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ, если диаметр провода более 1,56 *мм* — ПБО.

Для машин летательных аппаратов применяют провода марок ПЭЛ, ПЭВ-2, ПЭШО, ПЭЛШО, ПЭТСО.

Марку провода выбирают в зависимости от класса изоляции машины.

Если сечение провода $q > 30$ *мм*², обмотку выполняют из голой меди прямоугольного сечения (полосовой).

Катушки из изолированной меди для машин общего применения с внешней стороны изолируют одним слоем хлопчатобумажной или стеклянной ленты вполнахлеста; для машин летательных аппаратов — одним слоем лакошелка толщиной 0,06 *мм* вполнахлеста и одним слоем изоляционной ленты толщиной 0,18 *мм* вполнахлеста.

Витки голой меди (витковая изоляция) изолируют прессшпаном, миканитом, асбестом, слюдянитом (в зависимости от класса изоляции).

Готовые катушки пропитывают лаком или заливают компаундом.

а. Параллельная (шунтовая) обмотка

В зависимости от системы возбуждения (параллельной или смешанной) и наличия компенсационной обмотки м. д. с. параллельной обмотки различны. В остальном расчет не отличается.

1. М. д. с. обмотки возбуждения при собственном параллельном возбуждении

$$F_{ш}, a = F_{в} = F_{\Sigma} + F_{яп} \pm F_{япр} = F_{\Sigma} + F_{яр}. \qquad (3.67)$$

Для компенсированных машин $F_{яр} = 0$.

При смешанном компаундном возбуждении электродвигателей и генераторов

$$F_{ш}, a = F_{\Sigma} + F_{яп} \pm F_{япр} - F_{с} = F_{\Sigma} + F_{яр} - F_{с}; \qquad (3.68)$$

при противокомпаундном возбуждении

$$F_{ш}, a = F_{\Sigma} + F_{яп} \pm F_{япр} + F_{с} = F_{\Sigma} + F_{яр} + F_{с}. \qquad (3.69)$$

В равенствах (3.67) — (3.69): F_{Σ} — см. табл. 3.6;

$F_{яп}$, $F_{япр}$ — см. § 3.4;

$F_{с}$ — м. д. с. последовательной обмотки при смешанном возбуждении.

Величина $F_{с}$ зависит от требований к машине и от того, какая обмотка (параллельная или последовательная) является основной. Как правило, в машинах общего применения и для летательных аппаратов основной является параллельная обмотка.

Если последовательная обмотка предназначена для обеспечения устойчивости работы двигателя (стабилизирующая обмотка), ее м. д. с. выбирают:

для некомпенсированных машин

$$F_c,\ a=(0,1 \div 0,2)\,F_\Sigma; \tag{3.70а}$$

для компенсированных машин

$$F_c,\ a=(0,05 \div 0,10)\,F_\Sigma. \tag{3.70б}$$

Большая величина относится к генераторам, меньшая — к электродвигателям.

2. Сечение меди

$$q_ш,\ мм^2=\frac{k_{зап} m 2 p F_ш l_{ср.ш}}{5700 U_ш a_ш}. \tag{3.71}$$

Здесь $k_{зап}$ = 1,05—1,1 — коэффициент запаса для электродвигателей;
$k_{зап}$ = 1,2 — 1,25 — для генераторов;
m — см. табл. 2.9;
$F_ш$ — см. (3.67), (3.68), (3.69);
$U_ш$ — напряжение возбуждения;
$a_ш$ — число параллельных ветвей, обычно $a_ш = 1$;
$l_{ср.ш}$ — средняя длина витка обмотки (рис. 3.11);

$$l_{ср.ш},\ см=2(l_г+b_г)+\pi(b_к+2r_к), \tag{3.72}$$

где $l_г$ — см. (3.26), $b_г$ — см. (3.27);

Предварительно, в зависимости от размеров машины, принимают

$b_к$=1,5—5 *см* — ширина катушки;

$r_к$=0,3—1,0 *см* — радиус закругления катушки.

Для машин с собственным возбуждением $U_ш=U_н$.

Для машин с независимым возбуждением и для машин, работающих с регуляторами тока возбуждения (регуляторы возбуждения генераторов, регуляторы скорости электродвигателя), $U_ш = U_в$, где $U_в$ — напряжение на обмотке возбуждения, которое выбирается в зависимости от типа регулятора напряжения.

$q_ш$ корректируют в соответствии с ГОСТом (см. приложения 7, 9, 10).

3. Номинальный ток возбуждения

$$I_{шн},\ a=q_ш j_ш, \tag{3.73}$$

где $j_ш$ — плотность тока.

В машинах длительного режима с естественным охлаждением допускается $j_ш=3 \div 5$ *а/мм²*; с самовентиляцией — $j_ш=5 \div 7$ *а/мм²*; с продувом — $j_ш=6 \div 8$ *а/мм²*.

4. Число витков на полюс

$$w_ш=\frac{F_ш}{I_ш}. \tag{3.74}$$

Далее производят размещение обмотки в междуполюсном окне.

5. Сечение катушки полюса

$$S_{кш},\ мм^2=\frac{w_ш q_ш}{k_{зв}}\ , \qquad (3.75)$$

где $k_{зв}=0{,}5\div0{,}6$ — коэффициент заполнения медью сечения катушки возбуждения.

6. Вычерчивают эскиз междуполюсного окна в соответствующем масштабе, проверяют возможность размещения катушки, уточняют ширину катушки $b_к$. Если катушка не умещается в предварительно выбранном для нее пространстве, то увеличивают высоту главного полюса $h_г$, если же остается много свободного места, то наоборот — уменьшают $h_г$. После этого уточняют среднюю длину витка $l_{ср.ш}$. Если имеется последовательная обмотка, размещение проверяется после ее расчета.

7. Полная длина обмотки

$$L_ш,\ см=2pl_{ср.ш}\,w_ш, \qquad (3.76)$$

где $2p$ — см. § 1.5, п. 1; $l_{ср.ш}$ — см. (3.72); $w_ш$ — см. (3.74).

8. Сопротивление обмотки в холодном состоянии при $t=20°$ С

$$R_ш, ом=\frac{L_ш}{5700\,q_ш a_ш^2}\ , \qquad (3.77)$$

где $L_ш$ — см. (3.76); $q_ш$ — см. (3.71); $a_ш$ — см. (3.71).

9. Сопротивление обмотки в нагретом состоянии

$$R_{шн},\ ом=mR_ш, \qquad (3.78)$$

где m — см. табл. 2.11; $R_ш$ — см. (3.77).

10. Вес меди параллельной обмотки

$$G_{мш},\ н=87\,L_ш q_ш\cdot10^{-5}, \qquad (3.79)$$

где $L_ш$ — см. (3.76); $q_ш$ — см. (3.71).

6. Последовательная (сериесная) обмотка

Собственное последовательное возбуждение

1. М. д. с. при последовательном возбуждении

$$F_с=F_\Sigma+F_{яп}+F_{япр}=F_\Sigma+F_{яр}. \qquad (3.80)$$

Для компенсированных машин принимают $F_{яр}=0$.

2. Число витков на полюс

$$w_с=\frac{F_с}{I_я}\,a_с, \qquad (3.81)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б);

$a_с$ — число параллельных ветвей последовательной обмотки.

Принимают $a_c=2$, p и $2p$. При этом надо учитывать, что ток параллельной ветви $i_c=\frac{I_я}{a_c}$ не должен превышать 2500 *а*.

w_c округляют до ближайшего целого значения и уточняют F_c:

$$F_c=w_c\frac{I_я}{a_c}.$$

3. Сечение меди проводника

$$q_c=\frac{I_я}{a_c j_c}, \qquad (3.82)$$

где $I_я=I_1$ — см. (1.8а), (1.8б); a_c — см. замечание к (3.81); j_c — плотность тока в обмотке:

$j_c=2{,}5\div4{,}5$ $а/мм^2$ — для машин общего применения и летательных аппаратов с естественным охлаждением;

$j_c=5\div7$ $а/мм^2$ — для машин с самовентиляцией;

$j_c=6\div8$ $а/мм^2$ — для машин с продувом.

Для машин летательных аппаратов и маломощных при кратковременном режиме значения j_c могут быть увеличены на 15—25%.

q_c корректируют в соответствии с ГОСТом (см. приложения 7, 9 и 10).

При смешанном возбуждении

$$I_я=I_1-I_ш, \text{ где } I_ш \text{ — см. (3.73)}$$

4. Средняя длина витка обмотки $l_{ср.ш}$ определяется, как и $l_{ср.ш}$, по (3.72).

5. Вычерчивают эскиз междуполюсного окна в соответствующем масштабе и уточняют размеры катушки.

6. Полная длина обмотки

$$L_c,\ см=2pw_c l_{ср.с}, \qquad (3.83)$$

где $2p$ — см. § 1.5, п. 1; w_c — см. (3.81); $l_{ср.с}$ — см. (3.72).

7. Сопротивление последовательной обмотки в холодном состоянии при 20° С

$$R_c,\ ом=\frac{L_c}{5700\,q_c a_c^2}, \qquad (3.84)$$

где L_c — см. (3.83); q_c — см. (3.82); a_c — см. замечания к (3.81).

8. Сопротивление последовательной обмотки в нагретом состоянии

$$R_{сн},\ ом=mR_c, \qquad (3.85)$$

где m — см. табл. 2.11, R_c — см. (3.84).

9. Общий вес меди последовательной обмотки

$$G_{мс},\ н=87\,L_c q_c\cdot10^{-5}, \qquad (3.86)$$

где L_c — см. (3.83), q_c — см. (3.82).

Смешанное возбуждение

Последовательная обмотка при смешанном возбуждении может включаться последовательно с цепью якоря или параллельно цепи обмоток добавочных полюсов и компенсационной.

При небольших значениях м. д. с. целесообразнее второй способ подсоединения последовательной обмотки, так как уменьшается расход меди на соединение между катушками.

Последовательная обмотка при смешанном возбуждении рассчитывается так же, как и при собственном последовательном.

М. д. с. последовательной обмотки составляет часть общей м. д. с. и зависит от требований к машине (см. 3.70а и 3.70б).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

КОЛЛЕКТОР, ЩЕТКИ, ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛИ, ДОБАВОЧНЫЕ ПОЛЮСЫ

§ 4.1. КОЛЛЕКТОР

Коллектор — это наиболее ответственная часть машины постоянного тока в конструктивном, производственном и эксплуатационном отношениях (рис. 4.1). От качества его изготовления во многом зависит работоспособность машины. Показанные на рис. 1.11, 1.27, 1.33, и 4.1 коллекторы по конструкции различаются только креплением пластин. На рис. 4.2 дана коллекторная пластина с указанием размеров, которые определяются предварительно при электрическом расчете.

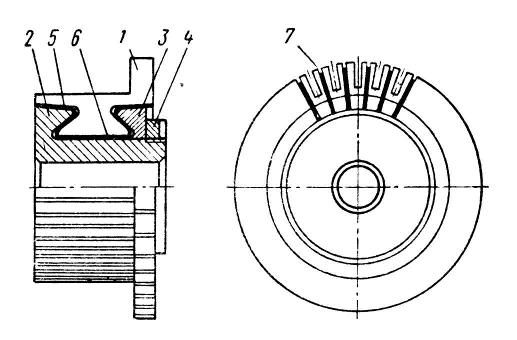


Рис. 4.1. Коллектор машины постоянного тока с креплением пластин конусной нажимной шайбой и гайкой:

1 — пластина коллектора; *2* — втулка; *3* — нажимной конус; *4* — гайка; *5* — изоляционный конус; *6* — изоляционный цилиндр; *7* — изоляционная прокладка между пластинами

Коллекторные пластины изготовляют из специальной холоднокатаной коллекторной меди, для коллекторов машин летательных аппаратов применяют кадмиевую медь, обладающую большей механической прочностью и меньшим износом на истирание. Изоляцией между пластинами служит миканит, слюда, пластмасса; изоляцией, отделяющей от корпуса — изолирующая пластмасса, миканит и др.

В § 2.2, п. 5 было определено число коллекторных пластин

$$K = \frac{N_я}{2w_{ся}}.$$

Диаметр рабочей поверхности коллектора

$$D_к,\ см = \frac{\tau_к K}{\pi}, \tag{4.1}$$

$\tau_к$ — коллекторное деление.

Исходя из практического опыта, рекомендуются следующие значения $\tau_к$ в зависимости от диаметра якоря машины $D_я$:

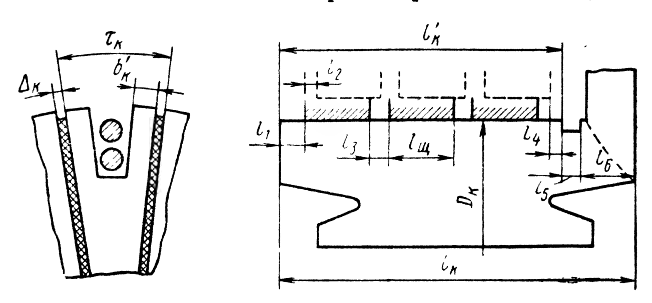


Рис. 4.2. Коллекторная пластина

В машинах с $D_я < 10$ *см*

$$\tau_к = 0{,}15—0{,}20\ см;$$

с $D_я > 10$ *см*

$$\tau_к = 0{,}20—0{,}45\ см.$$

Минимальный и максимальный размеры $D_к$ имеют ограничения: первый по механическим соображениям не может быть меньше 0,15 *см*, второй — по допускаемой скорости вращения коллектора $v_к$, которая определяется условиями коммутации и прочностью:

$$v_к,\ м/сек = \frac{\pi D_к n}{60} \cdot 10^{-2}, \tag{4.2}$$

где n — скорость вращения, *об/мин* (указывается в задании);
$D_к$ — см. (4.1).

Для машин общего применения допускается:
при использовании арочных коллекторов без бандажных колец $v_к \leqslant 35$ *м/сек*; при применении бандажных колец $v_к \leqslant 45$ *м/сек*.

Для машин летательных аппаратов $v_к = 50—55$ *м/сек*.

Для маломощных машин $v_к = 15—25$ *м/сек*.

Практически рекомендуется $D_к \approx (0{,}5 \div 0{,}8) D_я$.

Ширина коллекторной пластины

$$b_{кп},\ см = \tau_к - \Delta_к, \tag{4.3}$$

где $\tau_к$ — см. (4.1);

$\Delta_к$ — толщина изоляции между коллекторными пластинами;

$$\Delta_к = 0{,}04 \div 0{,}05 \text{ см}.$$

Толщина заплечика пластины $b_к'$ должна быть не менее 0,04 *см* (см. рис. 4.2).

Полная длина рабочей поверхности коллектора $l_к$ определяется после определения размера и количества щеток.

§ 4.2. ЩЕТКИ И ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛИ

Выбор марки щетки

В машинах постоянного тока используют щетки трех основных групп:

1) графитовые, марка Г;

2) электрографитированные, марка ЭГ;

3) меднографитовые, марки М, МГ, МГС.

Выбор марки щетки осуществляют с учетом внешних условий, в которых будет работать щетка, окружной скорости коллектора и условий коммутации.

В машинах общего применения напряжением до 500 *в* при нормальных условиях коммутации и скорости вращения коллектора $v_к \leqslant 20$ *м/сек* используют щетки ЭГ4, ЭГ14, ЭГ71, Г1, Г3, в случае затрудненных условий коммутации при $v_к \leqslant 35$ *м/сек* — ЭГ8, ЭГ14, ЭГ74.

В машинах для летательных аппаратов применяют специальные щетки А и МГС. Щетки МГС предназначены для работы в высотных условиях до 20 *км*. Необходимость в таких щетках объясняется тем, что на значительных высотах при отсутствии герметизации пространства, в котором находится машина, плотность воздуха и влажность резко уменьшаются, вследствие чего разрушается оксидная пленка на коллекторе и коэффициент трения между коллектором и щеткой возрастает, что вызывает значительный износ щеток. Высотные щетки МГС помогают сохранить оксидную пленку на коллекторе. В основном применяют высотные щетки МГС7, МГС8 и МГС9.

В маломощных низковольтных электродвигателях используют щетки М1, М6, МГ, в высоковольтных (110—220 *в*) — кроме указанных, Г3, ЭГ8.

Характеристики щеток по ГОСТ 2332—63 приведены в приложении 14, щеток для машин летательных аппаратов по ТУ — в приложении 15.

Для улучшения коммутации иногда применяют разрезные щетки. Толщина каждой такой щетки равна половине толщины неразрезной щетки.

Размеры щетки

Ширина щетки $b_щ$ определяется из условия допустимой ширины зоны коммутации $b_{зк}$: ширина щетки $b_щ$ не должна быть большой, чтобы не иметь большой ширины зоны коммутации, но она не должна быть и чрезмерно малой, чтобы обеспечить устойчивую работу узла щетка — коллектор. Практически установлено, что ширина щетки не должна превышать 2,5 *см.*

Предварительно можно принять

$$b_щ,\ см = (1 \div 3)\tau_к, \tag{4.4}$$

где $\tau_к$ — см. (4.1).

Затем величина $b_щ$ должна быть проверена по значению $b_{зк}$ согласно (4.13).

Длина щетки для обеспечения хорошей коммутации не должна быть больше $l_щ = (2{,}5 \div 3{,}2)$ *см*, причем больший размер относится к более мощным машинам.

Размеры щеток уточняются по ГОСТ 12232—66 (см. приложение 16).

Ширина соприкосновения щетки с коллектором, если выбран радиальный щеткодержатель —

$$b'_щ = b_щ; \tag{4.5а}$$

если выбран наклонный щеткодержатель —

$$b'_щ = \frac{b_щ}{\sin\alpha}, \tag{4.5б}$$

где α — угол наклона щетки по отношению к поверхности коллектора.

Поверхность соприкосновения щетки с коллектором

$$S_щ,\ см^2 = b'_щ l_щ, \tag{4.6а}$$

где $b_щ'$ — см. (4.5); $l_щ$ — см. § 4.2.

Число щеток на один щеточный болт

$$N_{щб} = \frac{I_я}{p_{щб} S_щ j_щ}, \tag{4.7}$$

где $I_я$ — см. (1.8а);
$S_щ$ — см. (4.6а);
$p_{щб}$ — число пар щеточных болтов;
$p_{щб} = 1 \div p$ — если обмотка волновая (где p — см. § 1.5, п. 1); рекомендуется, чтобы $p_{щб} = p$, так как в этом случае уменьшается осевая длина коллектора; $p_{щб} = p$ — если обмотка петлевая;
$j_щ$ — допустимая плотность тока под щеткой.

Плотности тока под щеткой:
для машин общего назначения $j_щ \leqslant 10$ *а/см²*;

для машин летательных аппаратов:

а) с естественным охлаждением $j_{щ}=5—10$ *а/см²*;

б) с самоохлаждением $j_{щ}=10—20$ *а/см²*;

в) с продувом $j_{щ}=16—35$ *а/см²*.

После выбора числа щеток на болт и размеров щеток уточняется плотность тока под щеткой и проверяется ее допустимость для выбранной марки щетки по табл. 4.1.

Таблица 4.1

Марки щеток	Г1	Г3	М1	М6	МГ	ЭГ2	ЭГ4	ЭГ8
$j_{щ}$, *а/см²*	7	10	15	15	20	10	12	10
Марки щеток	ЭГ14	ЭГ71	А8	А12	А16	А29	МГС7	МГС8
$j_{щ}$, *а/см²*	10—11	10—12	15	24	15	24	30—35	30—35

Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором

$$\sum S_{щ},\ см^2 = 2p_{щб}N_{щб}S_{щ}. \qquad (4.6б)$$

Активная (рабочая) длина коллектора (см. рис. 4.2)

$$l'_{к} = l_1 + l_2 + l_3(N_{щб} - 1) + l_{щ}N_{щб} + l_4 = N_{щб}(l_{щ} + l_3) + l_1 + l_2 - l_3 + l_4, \qquad (4.8а)$$

где l_1 и l_4 — припуски по краям коллектора;

l_2 — припуск на шахматное расположение щеток;

l_3 — расстояние между щетками (на 1—2 *мм* больше двойной толщины стенок обоймы щеткодержателя).

Для машин общего применения

$$l'_{к},\ см = N_{щб}(l_{щ} + 0{,}8) + 1{,}0; \qquad (4.8б)$$

для машин летательных аппаратов

$$l'_{к},\ см = N_{щб}(l_{щ} + 0{,}3) + (0{,}5 \div 0{,}7); \qquad (4.8в)$$

для маломощных машин

$$l'_{к},\ см = (1{,}5 \div 2{,}0)\,l_{щ}. \qquad (4.8г)$$

Если нагрев будет превосходить допустимые значения, следует увеличить $l_{к}'$, не увеличивая числа щеток на болт, или улучшить охлаждение коллектора.

Щеткодержатели

Щеткодержатели служат для обеспечения определенного положения щетки и создания нажатия на коллектор. Как уже отмеча-

лось, применяют коробчатые щеткодержатели, представляющие собой коробку прямоугольной или цилиндрической формы (см. рис. 1.12). Щетка может перемещаться в щеткодержателе в осевом направлении. В микромашинах используют цилиндрические щеткодержатели.

Чаще всего применяют два типа щеткодержателей (рис. 4.3):

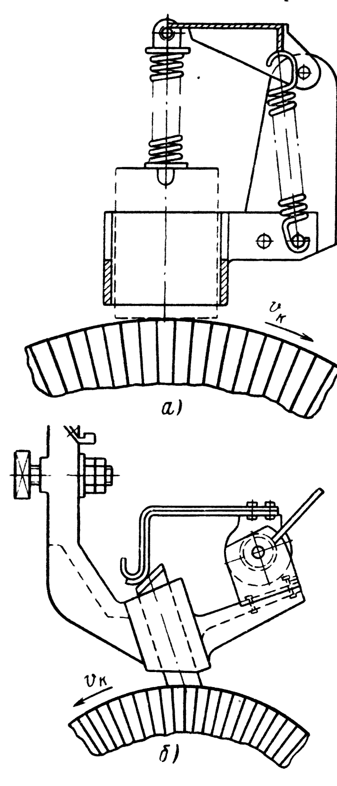


Рис. 4.3. Щеткодержатели: *а* — **радиальный;** *б* — **наклонный (реактивный)**

1) радиальный, с углом наклона оси щетки по отношению к поверхности коллектора $\alpha=90°$ (рис. 4.3, *а*);

2) наклонный (реактивный), с углом $\alpha=70°$ (рис. 4.3, *б*).

Радиальный щеткодержатель является универсальным и может применяться для нереверсивных и реверсивных машин.

Наклонный щеткодержатель по сравнению с радиальным обеспечивает меньшие силы трения между щеткой и щеткодержателем и вследствие этого более спокойную работу щетки; недостатком является то, что применять его можно лишь для одного направления вращения.

§ 4.3. ПРОВЕРКА КОММУТАЦИИ

При коммутации ток в секции обмотки якоря меняет свое значение от $+i_я$ до $-i_я$ (знак указывает направление тока). Такое резкое изменение тока вызывает искрообразование на коллекторе и под щетками. По степени искрения (устанавливаемой визуально) оценивают качество коммутации. Физические процессы коммутации очень сложны. Поэтому коммутационные параметры (ширину зоны коммутации, число коллекторных пластин, перекрываемых щеткой и т. п.), обеспечивающие удовлетворительные условия коммутации, определяют по приближенным зависимостям, учитывая опыт работы существующих машин.

При расчете машины качество коммутации определяют по величинам реактивной э. д. с. $e_р$ и э. д. с. от поперечного поля реакции якоря $e_{яр}$, возникающих в коммутируемой секции и действующих согласно.

Если значение $e_р+e_{яр}$ велико, применяют добавочные полюсы, обмотка которых создает поле, наводящее в короткозамкнутой секции обмотки якоря э. д. с. вращения $e_в$, компенсирующую $e_р+e_{яр}$.

Если $e_р + e_{яр}$ полностью компенсируются $e_в$, т. е. $e_в = e_р + e_{яр}$, то коммутация носит прямолинейный характер (на рис. 4.4 кривая *1*), если $e_р + e_{яр} > e_в$ — замедленный характер (кривые *2* и *3*), если $e_р + e_{яр} < e_в$ — ускоренный характер (кривые *4* и *5*).

В настоящее время почти все машины постоянного тока выполняются с добавочными полюсами. В этом случае можно допускать большие значения линейной нагрузки якоря A, так как несмотря на некоторое увеличение веса из-за добавочных полюсов, общий вес машин уменьшается.

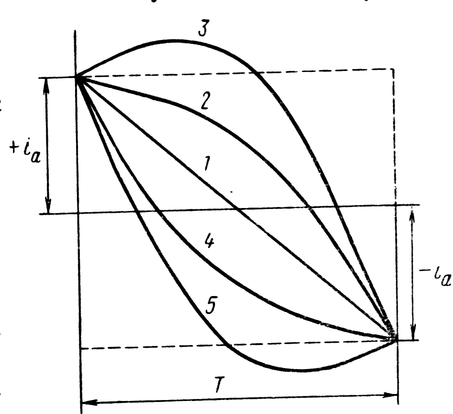


Рис. 4.4. Кривые тока в коммутируемой секции якоря:

1 — прямолинейная коммутация; *2, 3* — замедленная; *4, 5* — ускоренная

Особенно необходимо применение добавочных полюсов в машинах для летательных аппаратов. Это объясняется следующим:

а) эти машины всегда выполняются с повышенными значениями линейной нагрузки A и имеют высокую скорость вращения;

б) у генераторов и многих электродвигателей значительна величина э. д. с. реакции якоря $e_{яр}$, что ухудшает коммутацию;

в) большие вибрации и тряски, при которых работают машины для летательных аппаратов, вызывают необходимость увеличивать давление на щетки. При этом на щетке уменьшается переходное сопротивление щеточного контакта, что увеличивает ток коммутации, а следовательно, и искрение;

г) вследствие искрения при неблагоприятных условиях коммутаций наблюдается повышенный износ щеток.

Добавочные полюсы не применяют лишь в машинах мощностью менее 2 *квт*, так как в этом случае снижение веса и габаритов не оправдывает усложнение и увеличение себестоимости производства.

Реактивная э. д. с.

Реактивная э. д. с. коммутируемой секции

$$e_р, \; в = 2 w_{ся} l_l A v_я \xi \cdot 10^{-2}, \tag{4.9}$$

ξ — коэффициент, пропорциональный эквивалентной удельной магнитной проводимости паза, головок зубцов, лобовых частей обмотки и бандажей.

а) Для открытых прямоугольных пазов (см. рис. 2.9, 2.10)

$$\xi = \left(0{,}6 \frac{h_п}{b_п} + \frac{l_{лоб.я}}{l_l}\right) \cdot 10^{-4} + \frac{0{,}25 \cdot 10^2}{\frac{p}{a} w_{ся} l_l A v_я}; \tag{4.10а}$$

б) Для полузакрытых овальных пазов (см. рис. 2.12)

$$\xi=\left(0,6\,\frac{h_{п}}{2r_2}+\frac{h_{ш}}{b_{ш}}+\frac{l_{лоб.я}}{l_i}\right)\cdot 10^{-4}+\frac{0,25\cdot 10^2}{\frac{p}{a}\,w_{ся}l_iAv_{я}}\,. \qquad (4.10б)$$

В (4.9), (4.10а), (4.10б):
$w_{ся}$ — см. (2.3); l_i — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; A — см. (2.7); $v_я$ — см. (1.4); $b_п$, $h_п$ — см. (2.32а, 2.33а) — прямоугольные пазы, $h_п$ — см. (2.26) — овальные пазы; r_2 — см. (2.24), $l_{лоб.я}$ — см. (2.52а) (2.52б); $h_ш$, $b_ш$ — см. (2.22); p — см. § 1.5, п. 1; a — см. § 2.2, п. 1.

Для ориентировки при определении ξ можно исходить из следующих данных:

для машин малой мощности и $w_{ся}>1$ $\xi=6—12$;
для машин средней мощности $\xi=5—6$.

Э. д. с. от поперечного поля реакции якоря

а) *Без добавочных полюсов*

$$e_{яр},\ в=2w_{ся}l_iB_{яр}v_я\cdot 10^{-2}. \qquad (4.11а)$$

Здесь $w_{ся}$ — см. (2.3); l_i — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; $v_я$ — см. (1.4);
$B_{яр}$ — магнитная индукция в воздушном зазоре в зоне коммутации, в результате действия поперечной реакции якоря.

$B_{яр}$ можно определить по приближенной зависимости:

$$B_{яр},\ тл\cong 1,25\cdot 10^{-4}\frac{A}{1-\alpha_i}, \qquad (4.12)$$

где A — см. (2.7) и α_i — см. § 1.3, п. 3.

В случае, когда машина изготавливается с полным числом добавочных полюсов, $e_{яр}=0$.

Как правило, число добавочных полюсов берут равным числу главных. Однако в четырех- и двухполюсных машинах общего применения небольшой мощности и в машинах для летательных аппаратов иногда число добавочных полюсов уменьшают вдвое. Благодаря этому несколько уменьшаются вес и габаритные размеры машины.

б) *При половинном числе добавочных полюсов*

$$e_{яр},\ в=w_{ся}l_iB_{яр}v_я\cdot 10^{-2}, \qquad (4.11б)$$

Когда у машин общего применения и электродвигателей летательных аппаратов $e_р+e_{яр}<(1,5\div 2,5)$ *в* и у генераторов летательных аппаратов $e_р+e_{яр}\leqslant 0,5$*в*, коммутацию можно считать удовлетворительной и поэтому не снабжать машину добавочными полюсами. В генераторах для летательных аппаратов добавочные полюсы ставят при $e_р+e_{яр}>0,5$*в*. В противном случае добавочные полюсы необходимы и для машин мощностью менее 2 *квт*.

В маломощных машинах коммутацию можно считать удовлетворительной, если

$$e_{р}' + e_{яр}' < 0{,}5\ в \text{ в машинах с } U_{н} = 30\ в;$$

$$e_{р}' + e_{яр}' < 1{,}5\ в \text{ в машинах с } U_{н} = 110\ в.$$

Ширина зоны коммутации

Ширина зоны коммутации — это длина дуги окружности якоря, на которой располагаются коммутируемые секции

$$b_{зк},\ см = b_{щ} \frac{D_{я}}{D_{к}} + \left(u_{п} - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) \tau_{к}'. \qquad (4.13)$$

Здесь $b_{щ}$ — см. (4.4); $D_{я}$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; $D_{к}$ — см. (4.1); $u_{п}$, a, ε — см. § 3.2; p — см. § 1.5, п. а; $\tau_{к}'$ — коллекторное деление, приведенное к якорю,

$$\tau_{к}',\ см = \tau_{к} \frac{D_{я}}{D_{к}}, \qquad (4.14)$$

где $\tau_{к}$ — см. (4.1).

Рекомендуется для машин общего применения и летательных аппаратов

$$b_{зк},\ см \leqslant (\tau - b_{гн}), \qquad (4.15)$$

где τ — см. (1.13), $b_{гн}$ — см. (1.14а), (1.14б).

Обычно для машин общего применения принимают

$$b_{зк} = (0{,}5 \div 0{,}65)\ (\tau - b_{гн}) \qquad (4.15а)$$

Для машин летательных аппаратов при наличии добавочных полюсов рекомендуется

$$b_{зк},\ см = (0{,}65 \div 0{,}85)(\tau - b_{гн}), \qquad (4.15б)$$

при отсутствии добавочных полюсов —

$$b_{зк},\ см = (0{,}85 \div 1{,}13)(\tau - b_{гн}). \qquad (4.15в)$$

Однако иногда с целью сокращения длины машины допускается некоторое увеличение $b_{зк}$ по сравнению с (4.15 а, б, в). Практически в электродвигателях для летательных аппаратов допускают

$$b_{зк},\ см \leqslant 1{,}3(\tau - b_{гн}). \qquad (4.15г)$$

При этом нужно иметь в виду, что увеличение $b_{зк}$ вызывает возрастание потока в воздушном зазоре под добавочным полюсом, что ведет к увеличению размеров добавочного полюса, а также вызывает насыщение магнитной цепи главных полюсов.

Если $b_{зк}$ по (4.13) соответствует нормам по (4.15а), (4.15б) — (4.15г), ширина щетки $b_{щ}$ по (4.4) выбрана правильно, в противном случае $b_{щ}$ следует пересмотреть.

§ 4.4. РАЗМЕРЫ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Добавочные полюсы изготовляют цельными или собранными из штампованных стальных листов марки Э11 или Э12 толщиной $\Delta_д = 1$ *мм*.

Размеры добавочного полюса (см. рис. 4.5) определяют по магнитному потоку в воздушном зазоре под добавочным полюсом $\Phi_д$, который в свою очередь определяют по средней индукции в воздушном зазоре под добавочным полюсом $B_д$, и размерам наконечника добавочного полюса. Ширина дуги наконечника добавочного полюса

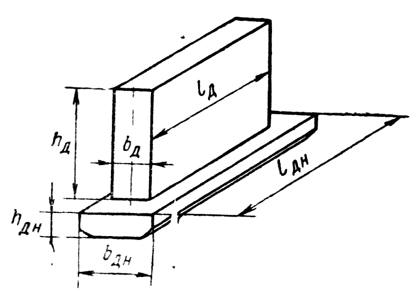


Рис. 4.5. Добавочный полюс

$$b_{дн},\ см = (0{,}6 \div 0{,}85)\, b_{зк}, \qquad (4.16а)$$

где $b_{зк}$ — см. (4.13), (4.15а) — (4.15г).

Меньшие значения соответствуют более мощным машинам.

Расчетная ширина дуги наконечника

$$b_{l\ дн},\ см = b_{дн} + (2 \div 3)\,\delta_д, \qquad (4.16б)$$

где $\delta_д$ — воздушный зазор под добавочным полюсом,

$$\delta_д = (1{,}0 \div 1{,}5)\,\delta. \qquad (4.17)$$

Воздушный зазор под добавочным полюсом $\delta_д$ увеличивают по сравнению с воздушным зазором под главным полюсом δ для того, чтобы машина работала на линейной части магнитной характеристики цепи добавочного полюса и имела меньшую величину реактивной э. д. с., а также для увеличения зоны безискровой работы.

Длина сердечника добавочного полюса обычно

$$l_д = l_я, \qquad (4.18а)$$

где $l_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4.

Иногда для сокращения средней длины витка обмотки добавочного полюса с целью уменьшения потерь в меди обмотки $l_д$ несколько укорачивают:

$$l_д,\ см = l_я - (2 \div 3). \qquad (4.18б)$$

Длина наконечника добавочного полюса чаще всего принимается равной длине якоря

$$l_{дн},\ см = l_я. \qquad (4.19а)$$

Расчетная длина наконечника добавочного полюса обычно

$$l_{l\ дн},\ см = l_l. \qquad (4.19б)$$

Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом:

а) при полном числе добавочных полюсов

$$B_{д},\ тл = \frac{e_{р}}{2w_{ся} l_{i\,дн} v_{я}} \cdot 10^{2}; \tag{4.20а}$$

б) при половинном числе добавочных полюсов

$$B_{д},\ тл = \frac{e_{р} + e_{яр}}{w_{ся} l_{i\,дн} v_{я}} \cdot 10^{2} \tag{4.20б}$$

или

$$B_{д},\ тл = \frac{e_{р}}{w_{ся} l_{i\,дн} v_{я}} \cdot 10^{2} + B_{яр}, \tag{4.20в}$$

где $e_{р}$ — см. (4.9); $e_{яр}$ — см. (4.11); $w_{ся}$ — см. § 2.2, п. 4; $l_{i\,дн}$ — см. (4.19б); $v_{я}$ — см. (1.4); $B_{яр}$ — см. (4.12).

В машинах для летательных аппаратов индукцию $B_{д}$ рассчитывают таким образом, чтобы наведенная ею в коммутируемой секции э. д. с. $e_{в}$ создавала несколько ускоренную коммутацию. Это объясняется тем, что создать полную компенсацию реактивной э. д. с. вследствие зубчатости ее кривой невозможно. Поэтому несколько ускоренная коммутация является предпочтительней, так как в этом случае плотность тока у сбегающего края щетки будет меньше. Обычно величина добавочной э. д. с. (сверх той, которая нужна для компенсации $e_{р}$ и $e_{яр}$) принимается равной 0,5 *в*. Формально это учитывается последним членом магнитной проводимости секции в (4.10а, 4.10б).

Магнитный поток в воздушном зазоре под добавочным полюсом

$$\Phi_{д},\ вб = B_{д} b_{i\,дн} l_{i\,дн} \cdot 10^{-4}, \tag{4.21}$$

где $B_{д}$ — см. (4.20а) — (4.20в), $b_{i\,дн}$ — см. (4.16б), $l_{i\,дн}$ — см. (4.19б).

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса

$$\Phi_{пд},\ вб = \sigma_{д} \Phi_{д}, \tag{4.22}$$

где $\Phi_{д}$ — см. (4.21);

$\sigma_{д}$ — коэффициент рассеяния добавочных полюсов; можно принять $\sigma_{д} = 1{,}3 \div 1{,}4$.

Сечение сердечника добавочного полюса

$$S_{д},\ см^{2} = b_{д} l_{д} K_{ст}, \tag{4.23}$$

где $l_{д}$ — см. (4.18а, 4.18,б); $K_{ст}$ — см. табл. 2.5;

$b_{д}$ — ширина сердечника добавочного полюса.

Обычно в начале $b_{д}$ определяется по эскизу согласно условиям размещения, а затем проверяется по величине индукции в сердечнике добавочного полюса $B_{пд}$ (см. 4.24). $b_{д}$ можно определить по зависимости $2p_{д} b_{д} = f(D_{я})$ на рис. 4.6.

Проверка насыщения магнитной цепи добавочных полюсов

Для того чтобы магнитная индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом $B_д$ изменялась пропорционально току нагрузки, необходимо обеспечить слабое насыщение магнитной цепи добавочных полюсов.

С этой целью необходимо сделать проверку насыщения на участках станины a'—b', c'—d' и спинки якоря a—b, c—d, где магнитные потоки главных и добавочных полюсов складываются (см. рис. 4.7),

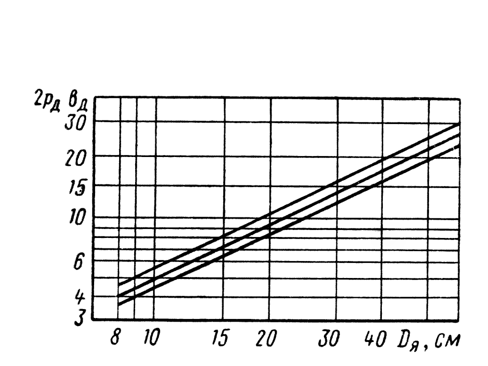


Рис. 4.6. Зависимость $2p_д b_д = f(D_я)$

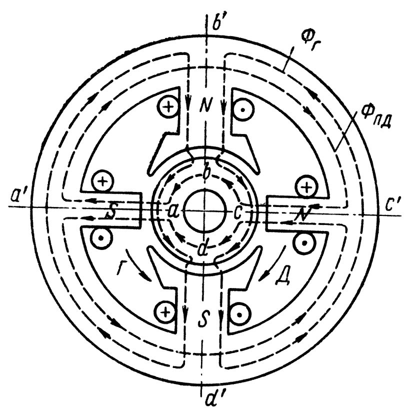


Рис. 4.7. Магнитная цепь машины при нагрузке

и в сердечнике добавочного полюса. Соответствующие индукции на этих участках не должны превосходить следующих величин:

$$B_{пд} \leqslant 1{,}3 \div 1{,}4 \; тл;$$

$$B'_с \leqslant 1{,}4 \div 1{,}5 \; тл;$$

$$B_я \leqslant 1{,}6 \div 1{,}7 \; тл.$$

Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса

$$B_{пд}, \; тл = \frac{\Phi_{пд}}{S_д} \cdot 10^4, \qquad (4.24)$$

где $\Phi_{пд}$ — см. (4.22), $S_д$ — см. (4.23).

На участках станины и спинки якоря проходят одновременно поток главных и поток добавочных полюсов; причем на половине полюсного деления потоки проходят согласно, а на другой половине — встречно.

Расчетная индукция в станине на участках, в которых складываются магнитные потоки главных и добавочных полюсов.

$$B'_с, \; тл = \frac{\sigma\Phi_я + \Phi_{пд}}{2S_с} \cdot 10^4, \qquad (4.25)$$

где σ — см. (3.25); $\Phi_я$ — см. (3.13);
$\Phi_{пд}$ — см. (4.22);
$S_с$ — см. (3.33).

Расчетная индукция в спинке якоря на участках, в которых складываются магнитные потоки главных и добавочных полюсов,

$$B_я', \ тл = \frac{\Phi_я + \Phi_д}{2S_я} \cdot 10^4, \tag{4.26}$$

где $\Phi_я$ — см. (3.13); $\Phi_д$ — см. (4.21); $S_я$ — см. (3.11а) и (3.11б).

Если подсчитанные по (4.24), (4.25), (4.26) значения $B_{пд}$, $B_с'$ и $B_я'$ превышают ранее указанные величины, следует увеличить сечение соответствующего участка.

§ 4.5. ОБМОТКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Определение м. д. с. обмотки

Обмотка добавочных полюсов соединяется последовательно с цепью якоря. Ее магнитодвижущая сила $F_д$ должна обеспечить в воздушном зазоре под добавочным полюсом требуемую величину магнитной индукции $B_д$. Эта м. д. с. слагается из падения магнитного напряжения в цепи добавочных полюсов $F_{цд}$ и м. д. с., затрачиваемой на преодоление м. д. с. реакции якоря $F_{яр}$:

$$F_д, \ a = F_{цд} + F_{яр}. \tag{4.27}$$

Здесь $F_{яр}$ — м. д. с. на один полюс при полном или половинном числе полюсов для некомпенсированных машин,

$$F_{яр}, \ a = 0{,}5\,\tau A, \tag{4.28}$$

где A — см. (2.7); τ — см. (1.13).

Для компенсированных машин часть реакции якоря компенсируется компенсационной обмоткой. В этом случае $F_{яр}$ следует уменьшить на величину м. д. с. компенсационной обмотки $F_к$.

Определение $F_{цд}$

А. Полное число добавочных полюсов

1. М. д. с. воздушного зазора под добавочным полюсом

$$F_{\delta_д}, \ a = 0{,}8\,\delta_д K_{\delta_д} B_д \cdot 10^4. \tag{4.29}$$

Здесь $\delta_д$ — см. (4.17);
$B_д$ — см. (4.20а);
$K_{\delta_д}$ — коэффициент воздушного зазора под добавочным полюсом.

$$K_{\delta_д} = \frac{t_1 + 10\,\delta_д}{t_1 - b_ш + 10\,\delta_д}, \tag{4.30}$$

где t_1 — см. (2.28); $b_ш$ — см. (2.22).

2. М. д. с. зубца под добавочным полюсом.

Индукция в зубце (см. § 3.1):

$$B_{Zд_1},\ тл = K_{Z_1} B_д; \quad (4.31)$$

$$B_{Zд_2},\ тл = K_{Z_2} B_д;$$

$$B_{Zд_3},\ тл = K_{Z_3} B_д,$$

где K_{Z_1}, K_{Z_2}, K_{Z_3} — см. (3.48).

В соответствии с индукциями $B_{Zд_1}$, $B_{Zд_2}$ и $B_{Zд_3}$ по кривым намагничивания выбранной для якоря марки стали (см. приложение 12) определяют напряженности поля в зубце $H_{Zд_1}$, $H_{Zд_2}$, $H_{Zд_3}$.

Среднее значение напряженности поля в зубце

$$H_{Zд_{ср}},\ а/см = \frac{H_{Zд_1} + 4H_{Zд_2} + H_{Zд_3}}{6}, \quad (4.32)$$

М. д. с. зубца под добавочным полюсом

$$F_{Zд},\ а = L_Z H_{Zд_{ср}}, \quad (4.33)$$

где L_Z — см. (3.42).

3. М. д. с. сердечника добавочного полюса.

Индукция в сердечнике добавочного полюса

$$B_{пд},\ тл = \frac{\Phi_{пд}}{b_д l_д K_{ст}} \cdot 10^4, \quad (4.34)$$

где $\Phi_{пд}$ — см. (4.22), $b_д$ и $l_д$ — см. (4.23);
$K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

Напряженность поля в сердечнике добавочного полюса $H_{пд}$ определяют по кривым намагничивания выбранной для добавочного полюса марки стали (см. приложение 12) в соответствии с $B_{пд}$.

М. д. с. сердечника добавочного полюса

$$F_{пд},\ а = L_д H_{пд}. \quad (4.35)$$

Здесь $L_д = h_д = h_г + \delta - \delta_д$,
где $h_г$ — см. (3.28); δ — см. § 3.1, п. г; $\delta_д$ — см. (4.17).

4. М. д. с. спинки якоря от совместного действия потоков главных и добавочных полюсов.

Индукция в спинке якоря от потока добавочных полюсов

$$B_{яд},\ тл = \frac{\Phi_д}{2h_я l_я K_{ст}} \cdot 10^4, \quad (4.36)$$

где $\Phi_д$ — см. (4.21); $h_я$ — см. (3.8); $l_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4;
$K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

Индукция в спинке якоря от согласного действия потоков главных и добавочных полюсов

$$B'_{яд},\ тл = B_я + B_{яд}. \quad (4.37)$$

Индукция в спинке якоря от встречного действия потоков главных и добавочных полюсов

$$B''_{\text{яд}},\ тл = B_{\text{я}} - B_{\text{яд}}, \tag{4.38}$$

где $B_{\text{я}}$ — см. (3.12); $B_{\text{яд}}$ — см. (4.36).

Напряженности поля в спинке якоря $H'_{\text{яд}}$ и $H''_{\text{яд}}$ (от согласного и встречного действия потоков главных и добавочных полюсов) определяют по кривым намагничивания стали якоря соответственно индукциям $B'_{\text{яд}}$ и $B''_{\text{яд}}$ (см. приложение 12).

М. д. с. спинки якоря

$$F_{\text{яд}},\ а = \frac{H'_{\text{яд}} - H''_{\text{яд}}}{2} L_{\text{я}}, \tag{4.39}$$

где $L_{\text{я}}$ — см. (3.43).

5. М. д. с. станины от совместного действия потоков главных и добавочных полюсов.

Индукция в станине от потока добавочных полюсов

$$B_{\text{сд}},\ тл = \frac{\Phi_{\text{пд}}}{2h_{\text{с}}l_{\text{с}}} \cdot 10^4, \tag{4.40}$$

где $\Phi_{\text{пд}}$ — см. (4.22); $h_{\text{с}}$ — см. (3.35); $l_{\text{с}}$ — см. (3.34).

Индукция в станине от согласного действия потоков главных и добавочных полюсов

$$B'_{\text{сд}},\ тл = B_{\text{с}} + B_{\text{сд}}, \tag{4.41}$$

где $B_{\text{с}}$ — см. (3.33); $B_{\text{сд}}$ — см. (4.40).

Индукция в станине от встречного действия потоков главных и добавочных полюсов

$$B''_{\text{сд}},\ тл = B_{\text{с}} - B_{\text{сд}}, \tag{4.42}$$

где $B_{\text{с}}$ — см. (3.33), $B_{\text{сд}}$ — см. (4.40).

Напряженность поля в станине от согласного $H'_{\text{сд}}$ и встречного $H''_{\text{сд}}$ действий потоков главных и добавочных полюсов определяют по кривым намагничивания для материала станины в соответствии с величиной индукции $B'_{\text{сд}}$, $B''_{\text{сд}}$ (см. приложение 12).

М. д. с. станины

$$F_{\text{сд}},\ а = \frac{H'_{\text{сд}} - H''_{\text{сд}}}{2} L_{\text{с}}, \tag{4.43}$$

где $L_{\text{с}}$ — см. (3.45).

6. М. д. с. воздушного зазора (стыка) между станиной и добавочным полюсом

$$F_{\text{стд}},\ а = 20\, B_{\text{пд}}, \tag{4.44}$$

где $B_{\text{пд}}$ — см. (4.24).

7. Полное падение м. д. с. на один полюс в цепи добавочных полюсов

$$F_{цд},\ a = F_{\delta_д} + F_{Z_д} + F_{пд} + F_{яд} + F_{сд} + F_{стд}, \qquad (4.45)$$

где $F_{\delta_д}$ — см. (4.29); $F_{Z_д}$ — см. (4.33); $F_{пд}$ — см. (4.35); $F_{яд}$ — см. (4.39); $F_{сд}$ — см. (4.43); $F_{стд}$ — см. (4.44).

8. М. д. с. обмотки добавочных полюсов — см. (4.27)

$$F_д = F_{цд} + 0{,}5\tau A.$$

Б. Половинное число добавочных полюсов

При половинном числе добавочных полюсов поток добавочного полюса замыкается через сердечник главного полюса. В этом случае для ненасыщенной магнитной цепи поток одноименного главного полюса меньше потока главных полюсов машины без добавочных полюсов на $0{,}5\Phi_д$, поток разноименного полюса — больше на $0{,}5\Phi_д$.

При этом рассчитывается цепь добавочный полюс — разноименный главный полюс.

1. М. д. с. воздушного зазора, зубца под добавочным полюсом, сердечника добавочного полюса, стыка между станиной и добавочным полюсом рассчитываются так же, как и в п. А.

2. М. д. с. зубца под главным полюсом.

Индукция в воздушном зазоре под главным полюсом от потока добавочного полюса

$$B_д,\ тл = \frac{\Phi_д}{2b_{i\,гн}l_г} \cdot 10^4, \qquad (4.46)$$

где $\Phi_д$ — см. (4.21); $b_{i\,гн}$ — см. (1.15); $l_г$ — см. (3.26).

Индукция в воздушном зазоре под главным полюсом от совместного действия потоков главного и добавочного полюсов

$$B'_\delta,\ тл = B_\delta + B_д, \qquad (4.47)$$

где B_δ — см. § 1.3, п. 2, $B_д$ — см. (4.46)

Индукция в зубцах:

$$\begin{aligned} B_{Z_1},\ тл &= K_{Z_1} B'_\delta; \\ B_{Z_2},\ тл &= K_{Z_2} B'_\delta; \\ B_{Z_3},\ тл &= K_{Z_3} B'_\delta, \end{aligned} \qquad (4.48)$$

где K_{Z_1}, K_{Z_2}, K_{Z_3} — см. (3.48); B'_δ — см. (4.47).

Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах якоря под главным полюсом

$$H'_{Z_{ср}},\ а/см = \frac{H'_{Z_1} + 4H'_{Z_2} + H'_{Z_3}}{6}. \qquad (4.49)$$

H'_{Z_1}, H'_{Z_2}, H'_{Z_3} определяют соответственно индукциям B'_{Z_1}, B'_{Z_2} и B'_{Z_3} по кривым намагничивания стали якоря (см. приложение 12) или при $B_Z > 1{,}8$ *тл* по кривым намагничивания для зубцов (см. приложение 13а, 13б) с учетом зубцовых коэффициентов C_{Z_1}, C_{Z_2}, C_{Z_3} по (3.46).

М. д. с. зубца под главным полюсом

$$F_{Z\text{г}}, a = L_Z H'_{Z_{\text{ср}}}, \tag{4.50}$$

где L_Z — см. (3.42); $H'_{Z_{\text{ср}}}$ — см. (4.49).

3. М. д. с. воздушного зазора под главным полюсом

$$F_{\delta_\text{г}}, a = 0{,}8 K_\delta \delta B'_\delta \cdot 10^4, \tag{4.51}$$

где K_δ — см. (3.18); δ — см. § 3.1, п. г; B'_δ — см. (4.47).

4. М. д. с. сердечника главного полюса.

Индукция в сердечнике главного полюса от совместного действия потоков главного и добавочного полюсов

$$B'_\text{г}, \textit{тл} = B_\text{г} + \frac{\sigma_\text{д} \Phi_\text{д}}{2 b_\text{г} l_\text{г}} \cdot 10^4, \tag{4.52}$$

где $B_\text{г}$ — см. (3.25), $\sigma_\text{д}$ — см. (4.22);
$\Phi_\text{д}$ — см. (4.21); $b_\text{г}$ — см. (3.27);
$l_\text{г}$ — см. (3.26).

Напряженность магнитного поля $H'_\text{г}$ определяют по кривым намагничивания для материала главного полюса по $B'_\text{г}$ (см. приложение 12).

М. д. с. сердечника главного полюса

$$F'_\text{г}, a = L_\text{г} H'_\text{г}, \tag{4.53}$$

где $L_\text{г}$ — см. (3.44).

5. М. д. с. спинки якоря.

Индукция в спинке якоря от совместного действия потоков главного и добавочного полюсов

$$B'_\text{я}, \textit{тл} = B_\text{я} + \frac{\Phi_\text{д}}{2 h_\text{я} l_\text{я} K_\text{ст}} \cdot 10^4, \tag{4.54}$$

где $B_\text{я}$ — см. (3.12); $\Phi_\text{д}$ — см. (4.21);
$h_\text{я}$ — см. (3.8); $l_\text{я}$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4;
$K_\text{ст}$ — см. табл. 2.5.

Напряженность магнитного поля в спинке якоря $H'_\text{я}$ определяют по кривым намагничивания материала якоря $B'_\text{я}$ (см. приложение 12).

М. д. с. спинки якоря

$$F'_\text{я}, a = L_\text{я} H'_\text{я}, \tag{4.55}$$

где $L_\text{я}$ — см. (3.43)

6. М. д. с. **станины.**

Индукция в станине от совместного действия потоков главного и добавочного полюсов

$$B_c', \ тл = B_г + \frac{\sigma_д \Phi_д}{2h_c l_c} \cdot 10^4, \tag{4.56}$$

где $B_г$ — см. (3.25); $\Phi_д$ — см. (4.21);
$\sigma_д$ — см. (4.22); h_c — см. (3.35);
l_c — см. (3.34).

Напряженность магнитного поля в станине от совместного действия потоков главного и добавочного полюсов H_c' определяют по кривой намагничивания для материала станины по B_c' (см. приложение 12).

М. д. с. станины

$$F_c', \ а = L_c H_c', \tag{4.57}$$

где L_c — см. (3.45).

7. М. д. с. воздушного зазора (стыка) между станиной и добавочным полюсом

$$F_{стд}, \ а = 20 B_{пд}, \tag{4.58}$$

где $B_{пд}$ — см. (4.24).

8. М. д. с. воздушного зазора (стыка) между станиной и главным полюсом

$$F_{стг}, \ а = 20 B_г', \tag{4.59}$$

где $B_г'$ — см. (4.52).

9. Полное падение м. д. с. на один полюс в цепи добавочных полюсов

$$F_{цд} = F_{\delta_д} + F_{z_д} + F_{пд} + F_{z_г} + F_{\delta_г} + F_г' + F_я' + F_c' + F_{стд} + F_{стг}, \tag{4.60}$$

где $F_{\delta_д}$ — см. (4.29); $F_{пд}$ — см. (4.35); $F_{z_д}$ — см. (4.33);
$F_{z_г}$ — см. (4.50); $F_{\delta_г}$ — см. (4.51); $F_г'$ — см. (4.53);
$F_я'$ — см. (4.55); F_c' — см. (4.57); $F_{отд}$ — см. (4.58);
$F_{стг}$ — см. (4.59).

М. д. с. обмотки добавочных полюсов

$$F_д, \ а = F_{цд} + 0{,}5\tau A - F_в. \tag{4.61}$$

Для компенсированных машин

$$F_д = F_{цд} + 0{,}5\tau A - F_к. \tag{4.62}$$

Здесь $F_{цд}$ — см. (4.45);

$$F_к = Z_к \frac{I_я}{a_к}, \qquad (4.63)$$

где $Z_к$ — см. (3.55); $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $a_к$ — см. (3.55).

При использовании компенсационной обмотки число добавочных полюсов должно быть взято полным.

Расчет обмотки

Обмотки добавочных полюсов изготавливают из круглого или прямоугольного изолированного провода в виде многослойной катушки, или из голого прямоугольного провода в виде однослойной катушки с намоткой на ребро (узкую сторону). Марка провода выбирается в зависимости от класса изоляции машин.

Витки неизолированного провода изолируются миканитовыми или асбестовыми прокладками толщиной 0,3—0,5 *мм*. Для уменьшения коэффициента рассеяния рекомендуется низкая катушка и размещение ближе к якорю.

Расчет обмотки добавочных полюсов производят так же, как и последовательной обмотки главных полюсов.

1. Число витков на одном добавочном полюсе

$$w_д = \frac{F_д a_д}{I_я}, \qquad (4.64)$$

где $F_д$ — см. (4.61) и (4.62);
$I_я$ — см. (1.8а), (1.8б);
$a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов;
$a_д$ = 1 или кратно p — числу пар полюсов.

В компенсированных машинах $a_д = a_к$.

2. Сечение провода обмотки

$$q_д,\ мм^2 = \frac{I_я}{a_д j_д}, \qquad (4.65)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б);
$a_д$ — замечания к (4.64);
$j_д$ — плотность тока в обмотке, *а/мм*^{2}.

В машинах общего применения допускается для многослойных обмоток $j_д = 3{,}0 \div 4{,}2$ *а/мм*^{2}; для однослойных обмоток $j_д = 2{,}5 \div 3{,}8$ *а/мм*^{2}. Меньшие значения плотности тока относятся к машинам с худшими условиями охлаждения.

В машинах для летательных аппаратов допускаются более высокие значения:

с самовентиляцией $j_д = 7 \div 10$ *а/мм*^{2};

с продувом $j_д = 9 \div 11$ *а/мм*^{2}.

Сечение $q_д$ согласно (4.65) уточняется по ГОСТу на провода (см. приложения *6*, *7*) с округлением до ближайшего большего значения. Рекомендуется при $q_д < 8$ *мм*^{2} применять круглый про-

вод, при $q_д > 8$ *мм*^{2} — прямоугольный, причем отношение большей стороны к меньшей — 1,4÷1,8.

Если $q_д > 25$ *мм*^{2}, следует применять однослойную обмотку.

3. Уточняется плотность тока в обмотке

$$j_д,\ a/мм^2 = \frac{I_я}{a_д q_д}, \tag{4.66}$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $a_д$ — см. замечание к (4.64); $q_д$ — см. (4.65).

4. Средняя длина витка многослойной катушки

$$l_{ср \cdot д},\ см = 2(b_д + l_д) + \pi(b_{дк} + 2r_к), \tag{4.67}$$

где $b_д$ — см. замечание к (4.23); $l_д$ — см. (4.18а), (4.18б);
$b_{дк}$ — ширина (вылет) катушки добавочного полюса, которую можно принимать равной 2—4 *см*;
$r_к$ — радиус закругления для многослойных катушек из изолированных или неизолированных проводов, намотанных плашмя; в зависимости от размеров машины его можно принимать 0,3—1,0 *см*.

Затем вычерчивается в масштабе эскиз магнитной системы главных и добавочных полюсов, проверяется укладка катушек добавочных полюсов, уточняются размеры катушек. После этого более точно подсчитывается средняя длина витка обмотки добавочного полюса $l_{ср.д}$.

5. Сопротивление обмотки добавочных полюсов в холодном состоянии (при 20° С)

$$R_д = \frac{L_д}{5700 q_д a_д^2}. \tag{4.68}$$

Здесь $q_д$ — см. (4.65), $a_д$ — см. замечание к (4.64);
$L_д$ — полная длина обмотки добавочных полюсов;

$$L_д,\ см = 2p_д l_{ср \cdot д} w_д, \tag{4.69}$$

где $2p_д$ — число катушек обмотки добавочных полюсов;
$l_{ср.д}$ — см. (4.67).

6. Сопротивление обмотки добавочных полюсов в нагретом состоянии

$$R_{дн},\ ом = mR_д, \tag{4.70}$$

где m — см. табл. 2.9; $R_д$ — см. (4.68).

7. Вес меди обмотки добавочных полюсов

$$G_д,\ н = 87 L_д q_д \cdot 10^{-5}, \tag{4.71}$$

где $L_д$ — см. (4.69); $q_д$ — см. (4.65).

8. Уточненное значение э. д. с. машины. После расчета обмотки добавочных полюсов следует уточнить значения э. д. с. машины $E_н$, потока якоря $\Phi_{ян}$, м. д. с. возбуждения $F_в$:

для генераторов

$$E_н = U_н + \Delta U_н; \tag{4.72}$$

для электродвигателей

$$E_н = U_н - \Delta U_н,$$

где $\Delta U_н$ — падение напряжения в цепи якоря при номинальной нагрузке в нагретом состоянии машины, *в*.

В общем случае

$$\Delta U_н,\ в = I_я(R_{ян} + R_{кн} + R_{дн} + R_{сн}) + \Delta U_щ, \tag{4.73}$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения в переходном контакте щеток, *в*;

$R_{ян}$, $R_{кн}$, $R_{дн}$, $R_{сн}$ — сопротивления в нагретом состоянии соответственно обмоток якоря, компенсационной обмотки, добавочных полюсов последовательной обмотки возбуждения (см. 2.53, 3.63, 3.85, 4.69).

Электрическое сопротивление контакта щеток зависит от материала щеток, плотности тока под щетками, окружной скорости коллектора и давления на щетки.

Для номинального тока (данной марки щеток) величина $\Delta U_щ$ указывается в ГОСТе на технические характеристики щеток (см. приложение 14) или в ТУ (см. приложение 15).

Учитывая, что на вращающемся коллекторе электрическое сопротивление контакта щеток неустойчиво, можно $\Delta U_щ$ условно принять не зависящим от тока и равным:

$\Delta U_щ = 2{,}0$ *в* — для угольных графитовых и электрографитированных щеток;

$\Delta U_щ \approx 0{,}6$ *в* — для меднографитовых и бронзографитовых.

Если уточненное значение э. д. с. машины отличается от э. д. с., определенной приближенно по (3.41а) и (3.41б), более чем на 5%, требуется перерасчет обмоток возбуждения.

9. Уточненное значение магнитного потока

$$\Phi_{ян},\ вб = \frac{60aE_н}{npN_я}, \tag{4.74}$$

где a — см. § 2.2, п. 1; $E_н$ — см. (4.72);
n — см. § 1.3, п. 5; p — см. § 1.5, п. 1;
$N_я$ — см. (2.2).

Если значение $\Phi_{ян}$, подсчитанное по (4.74) и определенное ранее, значительно отличается, необходимо пересчитать обмотку возбуждения.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

§ 5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ И К. П. Д.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) машины

$$\eta = \frac{P_{2н}}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_{2н}}{P_{2н} + \sum \Delta P} \cdot 100\%, \tag{5.1}$$

где $P_{2н}$ — номинальная полезная мощность;

$\sum \Delta P$ — сумма потерь в машине;

P_1 — потребляемая мощность.

В общем случае

$$\sum \Delta P,\ вт = \Delta P_{мя} + \Delta P_{мс} + \Delta P_{мш} + \Delta P_{мд} + \Delta P_{мк} + \\ + \Delta P_{кщ} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \tag{5.2}$$

где $\Delta P_{мя}$ — электрические потери в обмотке якоря, *вт*;

$\Delta P_{мс}$ — электрические потери в последовательной (сериесной) обмотке возбуждения, *вт*;

$\Delta P_{мш}$ — электрические потери в параллельной (шунтовой) обмотке возбуждения, *вт*;

$\Delta P_{мд}$ — электрические потери в обмотке добавочных полюсов, *вт*;

$\Delta P_{мк}$ — электрические потери в компенсационной обмотке, *вт*;

$\Delta P_{кщ}$ — электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе, *вт*;

$\Delta P_{ст}$ — магнитные потери в стали якоря, *вт*;

$\Delta P_{мех}$ — механические потери, *вт*;

$\Delta P_{доб}$ — добавочные потери, *вт*.

1. Электрические потери в обмотке якоря

$$\Delta P_{мя},\ вт = I_я^2 R_{ян}, \tag{5.3}$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $R_{ян}$ — см. (2.53).

2. Электрические потери в последовательной (сериесной) обмотке возбуждения

$$\Delta P_{мс},\ вт = I_с^2 R_{сн}, \tag{5.4}$$

где $R_{сн}$ — см. (3.84).

Значение тока $I_с$ при собственном последовательном возбуждении $I_с = I_я$; при смешанном возбуждении (по схеме рис. 3.7, *г*) для генератора $I_с = I_я = I_1 + I_ш$;
для электродвигателя $I_с = I_я = I_1 - I_ш$,
где I_1 — см. (1.7а) и (1.7б): $I_ш$ — см. (3.73).

3. Электрические потери в параллельной (шунтовой) обмотке возбуждения

$$\Delta P_{мш},\ вт = I_ш^2 R_{шн} = \frac{U_ш^2}{R_{шн}}, \qquad (5.5)$$

где $R_{шн}$ — см. (3.78); $I_ш$ — см. (3.73);

$U_ш$ — напряжение на зажимах параллельной обмотки, *в*.

Если в цепи параллельной обмотки содержится регулирующий реостат или постоянное сопротивление, то

$$\Delta P'_{мш},\ вт = \Delta P_{мш} + \Delta P_р = U'_ш I_ш, \qquad (5.6)$$

где $U'_ш$ — напряжение на зажимах цепи параллельной обмотки, *в*;

$\Delta P_р$ — мощность реостата, *вт*.

4. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$\Delta P_{мд},\ вт = I_я^2 R_{дн}, \qquad (5.7)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $R_{дн}$ — см. (4.68)

5. Электрические потери в компенсационной обмотке

$$\Delta P_{мк},\ вт = I_я^2 R_{кн}, \qquad (5.8)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $R_{кн}$ — см. (3.64).

6. Электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе

$$\Delta P_{кщ} = \Delta U_щ I_я, \qquad (5.9)$$

где $\Delta U_щ$ — см. (4.72); $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б)

7. Магнитные потери в стали якоря

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{стя} + \Delta P_{ст\,Z}, \qquad (5.10)$$

где $\Delta P_{стя}$ и $\Delta P_{ст\,Z}$ — потери от гистерезиса и вихревых токов в спинке якоря и в его зубцах соответственно.

а. Потери от гистерезиса и вихревых токов в спинке якоря

$$\Delta P_{стя},\ вт = 0{,}102 K_{яс} B_я^2 G_{стя}, \qquad (5.11)$$

где $B_я$ — см. (3.12); $G_{стя}$ — вес спинки якоря;

$K_{яс}$ — коэффициент, зависящий от марки и толщины стали.

Значения $K_{яс}$ для сталей толщиной 0,5 *мм* марок Э11, Э12, Э13, Э21, Э22 и Э31, Э32 даны в табл. 5.1.

Вес спинки якоря

$$G_{стя},\ н = 76\,\frac{\pi}{4}(D_Z^2 - d_я^2)\, l K_{ст} \cdot 10^{-3}, \qquad (5.12)$$

где $D_Z = D_я - 2h_п$; $D_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; $h_п$ — см. (2.26) (2.33); (2.38); $d_я$ — см. (3.9); l — см. (3.2); $K_{ст}$ — см. табл. 2.5.

б. Потери от гистерезиса и вихревых токов в зубцах якоря

$$\Delta P_{\text{ст} Z},\ н = 0{,}102 K_Z B^2_{Z_2} G_{\text{ст} Z}, \tag{5.13}$$

где B_{Z_2} — см. табл. 3.7;
K_Z — см. табл. 5.1;
$G_{\text{ст}Z}$ — вес стали зубцов якоря.

У якоря с открытыми пазами

$$G_{\text{ст} Z} = 76 Z b_{Z_2} h_{\text{п}} l K_{\text{ст}} \cdot 10^{-3}, \tag{5.14а}$$

где Z — см. § 2.2, п. 7; b_{Z_2} — см. (2.47);
$h_{\text{п}}$ — см. (2.33); l — см. (3.2).

У якоря с овальными пазами

$$G_{\text{ст} Z},\ н = 76 Z b_{Z_2} \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l K_{\text{ст}} \cdot 10^{-3}, \tag{5.14б}$$

где Z — см. § 2.2; b_{Z_2} — см. (2.4); l — см. (3.2);
h_1 — см. (2.25); r_1 и r_2 — см. (2.23) и (2.24);
$K_{\text{ст}}$ — см. табл. 2.5.

Таблица 5.1

Пазы	Марка электротехнической стали, толщина листа 0,5 *мм*	
	Э11, Э12, Э13 и Э21, Э22 (слабо- и среднелегированная)	Э31, Э32 (повышеннолегированная)
Открытые K_Z	$\frac{f^2 + 30f}{350}$	$\frac{f^2 + 100f}{1300}$
Открытые $K_{\text{нс}}$	$\frac{f^2 + 70f}{500}$	$\frac{f^2 + 200f}{1700}$
Полузакрытые (овальные) K_Z	$\frac{f^2 + 30f}{450}$	$\frac{f^2 + 100f}{1700}$
Полузакрытые (овальные) $K_{\text{нс}}$	$\frac{f^2 + 70f}{650}$	$\frac{f^2 + 200f}{2200}$

8. Механические потери.

а. Потери от трения щеток о коллектор

$$\Delta P_{\text{тщ}},\ вт = k_{\text{т}} \sum S_{\text{щ}} p_{\text{щ}} v_{\text{к}}, \tag{5.15}$$

где $k_{\text{т}}$ — коэффициент трения щеток о коллектор, $k_{\text{т}} = 0{,}2$—$0{,}3$;
$\Sigma S_{\text{щ}}$ — поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, *см²* — см. (4.6б);
$p_{\text{щ}}$ — удельное давление на щетки, *н/см²*.

Для машин общего применения и маломощных

$p_{\text{щ}} = 2$—3 *н/см²*.

Для машин летательных аппаратов из-за вибрации и тряски при работе $p_щ$ должно быть значительно выше:

для электродвигателей $p_щ = 3—8$ *н/см²*;

для генераторов $p_щ = 5—9$ *н/см²*.

б. Потери от трения в подшипниках $\Delta P_{тп}$ зависят от многих факторов, которые не всегда можно учесть: степени шлифовки трущихся поверхностей, сорта смазки, температуры.

в. Вентиляционные потери $\Delta P_в$—потери в вентиляции и от трения якоря о воздух еще более трудно определить. Для определения потерь в подшипниках качения и вентиляционных можно пользоваться практическими зависимостями, приведенными на рис. 5.1.

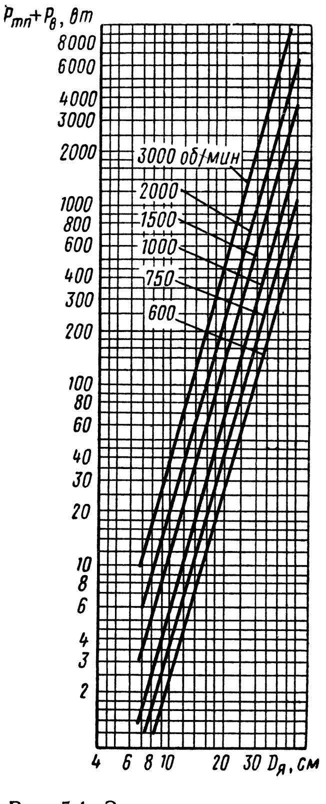


Рис. 5.1. Зависимость потерь от трения в подшипнике качения и на вентиляцию от диаметра якоря $D_я$

Для машин летательных аппаратов и маломощных можно принимать

$$\Delta P_{тп} + \Delta P_в = 0{,}04 P_н. \qquad (5.16)$$

Таким образом, механические потери

$$\Delta P_{мех},\ вт = \Delta P_{тщ} + \Delta P_{тп} + \Delta P_в. \qquad (5.17)$$

9. Добавочные потери — это потери от вихревых токов в коллекторных пластинах, потери от гистерезиса и вихревых токов в полюсных наконечниках, потери в бандажах.

Можно принимать

$$\Delta P_{доб},\ вт = 0{,}01 P_н. \qquad (5.18)$$

После определения $\Sigma\Delta P$ по (5.2) определяют к. п. д. по (5.1). Затем для электродвигателей определяют ток сети

$$I_1,\ а = \frac{P_1}{U_н}, \qquad (5.19)$$

где

$$P_1,\ вт = P_{2н} + \sum \Delta P.$$

Если ток сети I_1 по (5.19) отличается более, чем на 5% от I_1 по (1.7а), осуществляют перерасчет $E_н$, F_Σ, потерь в обмотках (возбуждения, добавочных полюсов, компенсационной), $\Sigma\Delta P$ и снова по (5.19) определяют ток I_1.

При отклонении скорости вращения n более, чем на 5% от заданной, необходим также перерасчет обмоток возбуждения.

§ 5.2. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН

А. Характеристики электродвигателей

Основными рабочими характеристиками электродвигателей постоянного тока являются:

1) механическая $n=f(M_2)$ или $n=f(P_2)$;
2) $I_я=f(M_2)$ или $I_я=f(P_2)$;
3) $\eta=f(M_2)$ или $\eta=f(P_2)$.

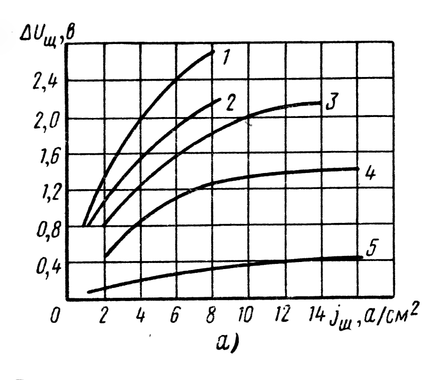
Расчет рабочих характеристик рекомендуется производить в следующем порядке.

1. Задаются несколькими значениями тока якоря от $I_я=0$ до пускового (тока короткого замыкания) $I_я=I_{як}$.

В общем случае для смешанной системы возбуждения (по рис. 3.7, *г*)

$$I_{як},\ a=\frac{U-\Delta U_{щк}}{R_{ян}+R_{сн}+R_{дн}+R_{кн}}\ , \qquad (5.20)$$

где U — см. задание:
$\Delta U_{щк}$ — см. (4.73), рис. 5.2; $\Delta U_{щк}$ определяют по приближенному значению тока якоря, найденному по (5.20) при $\Delta U_щ=0$;
$R_{ян}$ — см. (2.53); $R_{сн}$ — см. (3.85); $R_{кн}$ — см. (3.64);
$R_{дн}$ — см. (4.68).



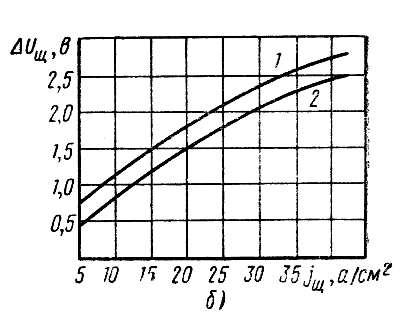


Рис. 5.2. Зависимость падения напряжения под щетками от плотности тока под щеткой: $\Delta U_щ=f(j_щ)$:

а — щетки различных марок: *1* — угольнографитовые; *2* — графитовые; *3* — электрографитовые; *4* — меднографитовые; *5* — бронзографитовые; *б* — щетки для машин летательных аппаратов: *1* — МГС-8; *2* — МГС-7

Затем для каждого из заданных значений тока якоря определяют

$$E,\ F_\Sigma,\ \Phi_{я\,наг},\ n,\ \sum\Delta P,\ P_2,\ M_2,\ \eta.$$

2. Э. д. с. якоря

$$E=U-\Delta U, \qquad (5.21)$$

где при параллельном возбуждении

$$\Delta U,\ в = I_я(R_{ян} + R_{дн} + R_{кн}) + \Delta U_щ;$$

при последовательном и смешанном возбуждении (по схеме рис. 3.7, *г*)

$$\Delta U,\ в = I_я(R_{ян} + R_{сн} + R_{дн} + R_{кн}) + \Delta U_щ.$$

3. М. д. с. при смешанном возбуждении (общий случай) согласно схеме рис. 3.7, *г*

$$F_\Sigma = \frac{I_я}{a} w_с + \frac{U}{R_{шн}} w_ш, \qquad (5.22)$$

где $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); a — см. § 2.2, п. 1; $w_с$ — см. (3.81); $R_{шн}$ — см. (3.78); $w_ш$ — (3.74).

4. Магнитный поток при нагрузке для каждого значения тока якоря определяют по кривой $Ф_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$ при $I_я = \text{const}$, соответствующей данному значению тока якоря.

Чтобы получить эту зависимость для ряда значений тока якоря $I_{я1}$, $I_{я2}$, ..., $I_{яn}$ необходимо осуществить следующее.

1) Определить величину $\Delta Ф_я$, на которую уменьшается поток при нагрузке вследствие размагничивающего действия реакции якоря. Строят характеристику $Ф_я = f(F_{\delta+z})$. Влево и вправо от точки *a* (рис. 5.3) на кривой, соответствующей данному значению потока $Ф_я$, откладывают отрезки *ac* и *ag*, каждый равный 0,5 $Ab_{iгн}$ (как это делали при определении м. д. с. реакции якоря $F_{яр}$).

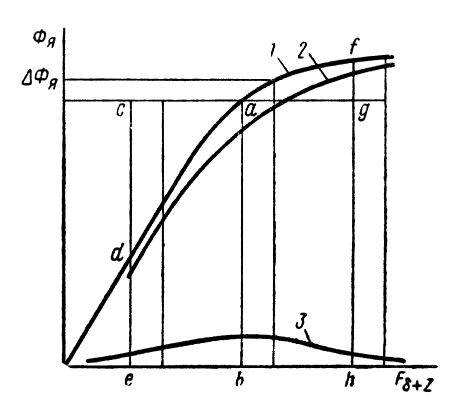


Рис. 5.3. Определение зависимости $\Delta Ф_я = f(F_{\delta+Z})$:

1 — $\Delta Ф_я = f(F_{\delta+Z})$; 2 — переходная характеристика при холостом ходе $Ф_{я0} = f(F_{\delta+Z})$; 3 — переходная характеристика при нагрузке $Ф_{я\,наг} = f(F_{\delta+Z})$

Величину $\Delta Ф_я$, на которую уменьшается поток при нагрузке, можно определить следующим образом (см. рис. 5.3):

$$\Delta Ф_я = Ф_я - Ф_{я\,ср}, \qquad (5.23)$$

где $Ф_я$ — значение потока при заданном режиме работы; величина $Ф_я$ на рис. 5.3 в масштабе равна отрезку *ab*;

$Ф_{яср}$ — среднее значение потока.

Величина $Ф_{яср}$ может быть определена по формуле приближенной квадратуры

$$Ф_{я\,ср} = \frac{1}{6}(Ф_{я\min} + 4Ф_я + Ф_{я\max}). \qquad (5.24)$$

Значения $\Phi_{я\,min}$ и $\Phi_{я\,max}$ в масштабе равны соответственно отрезкам de и fh на переходной характеристике рис. 5.3.

Затем получают зависимость $\Delta\Phi_я = f(F_{\delta+z})$ для ряда рабочих точек.

2) Строят переходную характеристику при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = \Phi_я - \Delta\Phi_я = f(F_{\delta+z})$, вычитая из ординат переходной характеристики при холостом ходе $\Phi_{я0} = f(F_{\delta+z})$ соответствующие значения $\Delta\Phi_я$. (Подобное построение для одного значения тока якоря $I_я$ см. на рис. 5.3.)

Чтобы получить семейство переходных характеристик при нагрузке для токов $I_{я1}$, $I_{я2}$, ..., $I_{яn}$, нужно вычислить значения линейной нагрузки, соответствующей каждому значению тока якоря:

$$A_1 = \frac{N_я I_{я1}}{2a\pi D_я},\quad A_2 = \frac{N_я I_{я2}}{2a\pi D_я}, \ldots \quad A_n = \frac{N_я I_{яn}}{2a\pi D_я} [а/см]$$

и соответственно $0{,}5A_1 b_{i\,гн}$; $0{,}5A_2 b_{i\,гн}$;..$0{,}5A_n b_{i\,гн}$,

где $N_я$ — см. § 2.2, п. 3; $D_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4; a — см. § 2.2 п. 1 $b_{i\,гн}$ — см. (1.15),

и для каждого значения тока якоря определить зависимости

$$\Delta\Phi = f(F_{\delta+z}) \text{ и } \Phi_{я\,наг} = f(F_{\delta+z}).$$

3) Для каждого из заданных значений тока якоря на одном графике построить характеристики:

а) намагничивания при холостом ходе $\Phi_{я0} = f(F_\Sigma)$;

б) переходную при холостом ходе $\Phi_{я0} = f(F_{\delta+z})$;

в) переходную при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\delta+z})$, полученную в п. 2).

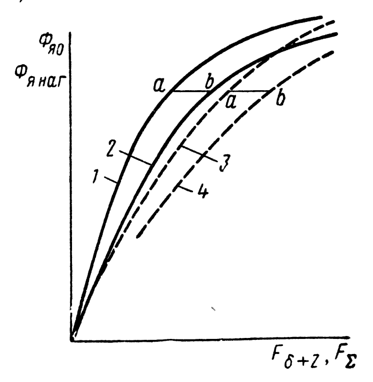


Рис. 5.4. К построению зависимости тока при нагрузке $\Phi_{я\,наг}$ от полной м. д. с. цепи F_Σ при данном значении нагрузки (I=const):

1 — переходная характеристика при холостом ходе $\Phi_{я0} = f(F_{\delta+z})$; 2 — характеристика холостого хода $\Phi_{я0} = f(F_\Sigma)$; 3 — переходная характеристика при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\delta+z})$; 4 — характеристика намагничивания при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$

4) На основе этих характеристик построить зависимость потока при нагрузке $\Phi_{я\,наг}$ от суммарной м. д. с. магнитной цепи F_Σ $\Phi_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$.

Построение для одного значения тока $I_я$ дано на рис. 5.4: к абсциссам переходной характеристики при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\delta+z})$ прибавляют отрезки (абсциссы) ab, заключенные между характеристиками намагничивания и переходной при холостом

ходе, в результате чего получают искомую зависимость $\Phi_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$. После подобных построений для каждого значения тока якоря получают семейство зависимостей $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\delta+z})$ при $I_я = \mathrm{const}$ (см. рис. 5.5).

5. Скорость вращения электродвигателя для каждого значения тока якоря

$$n,\ об/мин = \frac{60aE}{pN_я\Phi_{я\,наг}}, \tag{5.25}$$

где a — см. § 2.2, п. 1; E — см. (5.21);
$N_я$ — см. § 2.2, п. 3; $\Phi_{я\,наг}$ — см. § 5.2, п. 4.

Далее следует для каждого значения тока якоря определить момент на валу двигателя M_2 и коэффициент полезного действия η.

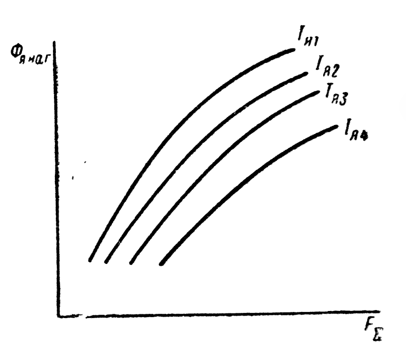


Рис. 5.5. Характеристика намагничивания при нагрузке $\Phi_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$

При этом подсчитывают следующие величины для каждого значения тока якоря $I_я$.

6. Потери в машине (см. § 5.1) и $\Sigma\Delta P$.

Для определения потерь в стали подсчитывают коэффициенты $K_{яс}$, K_Z по табл. 5.1, $B_я, B_\delta$, B_Z, для каждого значения потока $\Phi_{я\,наг}$.

7. Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2,\ вт = P_1 - \sum \Delta P, \tag{5.26}$$

где $P_1 = U_п I_1$; $\sum \Delta P$ см. § 5.2, п. 6.

8. Полезный момент на валу

$$M_2,\ н \cdot м = 9{,}55\,\frac{P_2}{n}. \tag{5.27}$$

При этом для $I_{як}$ пусковой момент

$$M_{пуск},\ н \cdot м = M_{эк} - M_{тщ} - M_{тп} - M_г. \tag{5.28}$$

Момент электромагнитный при коротком замыкании

$$M_{эк} = 0{,}159\,\frac{p}{a}\,N_я\Phi_{як}I_{як}, \tag{5.29}$$

где $\Phi_{як}$ определяется по кривой $\Phi_{я\,наг} = f(F_\Sigma)$ при $I_я = I_к = \mathrm{const}$;
$N_я$ — см. § 2.2, п. 3; $I_{як}$ — см. (5.20).

Момент потерь от трения щеток о коллектор

$$M_{тщ},\ н \cdot м = 9{,}55 \frac{\Delta P_{тщ}}{n}, \qquad (5.30)$$

где $\Delta P_{тщ}$ — см. (5.15).

Момент потерь от трения в подшипниках

$$M_{тп},\ н \cdot м = 9{,}55 \frac{\Delta P_{тп}}{n}, \qquad (5.31)$$

где $\Delta P_{тп}$ — см. рис. 5.1.

Момент потерь на гистерезис $M_г$ обычно значительно меньше $M_{эк}$ и им можно пренебречь.

Кратность пускового момента (с запасом)

$$m_{пуск} = \frac{M_{эк}}{M_н} \quad или \quad m_{пуск} = \frac{\Phi_{як} I_{як}}{\Phi_{ян} I_{ян}}, \qquad (5.32)$$

где $M_{эк}$ — см. (5.29);

$M_н$ — момент при номинальном значении тока.

9. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \qquad (5.33)$$

По подсчитанным значениям строят зависимости

$$n = f(M_2); \ I_я = f(M_2) \ \ \eta = f(M_2).$$

Для двигателей последовательного возбуждения они приведены на рис. 5.6, *а*, для двигателей параллельного возбуждения — на рис. 5.6, *б*. Рабочие характеристики электродвигателей смешанно-

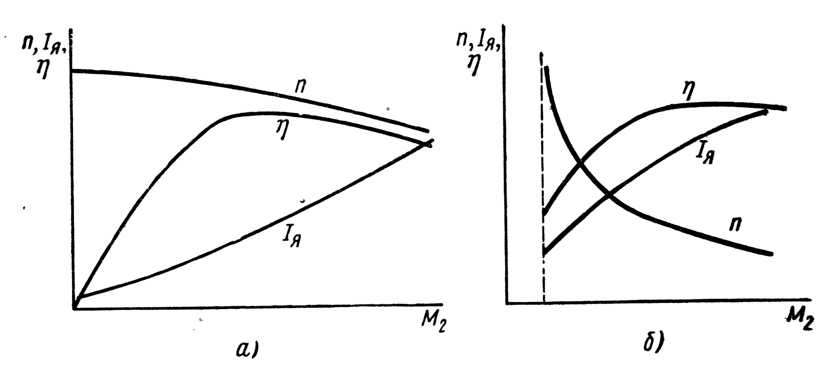


Рис. 5.6. Рабочие характеристики электродвигателей:
а — при параллельном возбуждении; *б* — при последовательном возбуждении

го возбуждения приближаются к характеристикам двигателя последовательного или параллельного возбуждения в зависимости от того, какая из его обмоток является основной — последовательная или параллельная.

Б. Характеристики генераторов

Рабочими характеристиками генераторов являются:

1) нагрузочная $U=f(I_в)$ при $I=\text{const}$, $n=\text{const}$;

2) внешняя $U=f(I)$ при $R_в=\text{const}$, $n=\text{const}$,

где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения;

3) регулировочная $I_в=f(I)$ при $U=\text{const}$, $n=\text{const}$,

где $I_в$ — ток в обмотке возбуждения.

Две последние характеристики строят на основе семейства нагрузочных характеристик $U=f(I_в)$.

Нагрузочная характеристика

Построение нагрузочной характеристики при $I=\text{const}$ и $n=\text{const}$ можно осуществлять на основе характеристики потока при $\Phi_{я\,наг}=f(F_\Sigma)$ для данного тока нагрузки якоря (см. п. А данного параграфа).

Ординаты кривой $\Phi_{я\,наг}=f(F_\Sigma)$ (см. рис. 5.5) умножают на коэффициент K_E, что дает значение э. д. с. E;

$$K_E=\frac{p}{a}\cdot\frac{N_я}{60}n, \qquad (5.34)$$

где p — см. § 1.5, п. а; a — см. § 2.2; $N_я$ — см. (2.2);
n — см. § 1.3, п. 5.

Для того чтобы пересчитать ординаты в значениях напряжения, следует вычесть из них падения напряжения под щетками $\Delta U_щ$ и в обмотках (якоря, последовательной возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной), т. е. ΔU.

В общем случае

$$U,\ в=K_E\Phi_{я\,наг}-(R_{ян}+R_{сн}+R_{дн}+R_{кн})I_я-\Delta U_щ \qquad (5.35)$$

где $\Phi_{я\,наг}$ — задаются по кривой рис. 5.4;
$R_{ян}$ — см. (2.53); $R_{сн}$ — см. (3.85); $R_{дн}$ — см. (4.69);
$R_{кн}$ — см. (3.64); $I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $\Delta U_щ$ — см. (4.72) и рис. 5.2; ΔU — в зависимости от системы возбуждения см. (5.21).

Абсциссы нагрузочной характеристики $I_в$ определяют из уравнения для схемы рис. 3.7, г

$$I_в=\frac{F_\Sigma-I_я w_с}{w'_ш}, \qquad (5.36)$$

где F_Σ — полная м. д. с., соответствующая данному значению $\Phi_{я\,наг}$;
$I_я$ — см. (1.8а), (1.8б); $w_с$ — см. (3.81); $w_ш$ — см. (3.74).

Следует построить несколько нагрузочных характеристик для ряда значений тока нагрузки якоря (дано на рис. 5.7).

Внешняя характеристика

Построение внешней характеристики производится следующим образом. На графике семейства нагрузочных характеристик (см. рис. 5.7) строят характеристику падения напряжения в цепи возбуждения $U_в = f(I_в)$, которая представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат; уравнение для нее

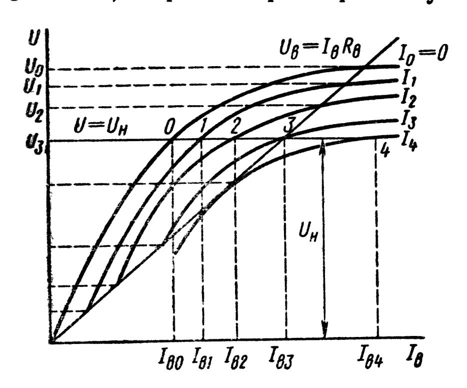


Рис. 5.7. Нагрузочные характеристики генератора постоянного тока

$$U_в = I_в R_в,$$

где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения;

$I_в$ — произвольное значение тока возбуждения.

Пересечение характеристики цепи возбуждения с нагрузочными характеристиками дает искомые точки внешней характеристики (см. рис. 5.8).

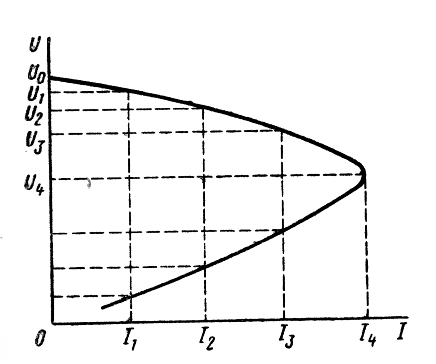


Рис. 5.8. Внешняя характеристика генератора постоянного тока

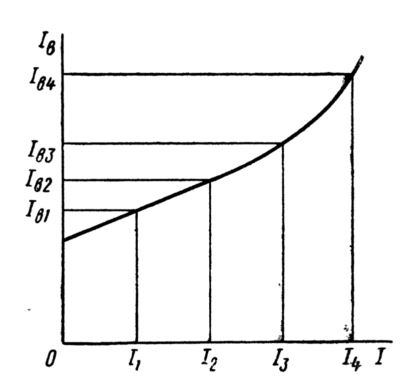


Рис. 5.9. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока

Регулировочная характеристика

Регулировочную характеристику получают по нагрузочной, проведя на ней характеристику $U = U_{наг} = \mathrm{const}$ (см. рис. 5.7). Точки пересечения прямой $U_{наг}$ с кривыми семейства нагрузочных характеристик определяют зависимость $I_в = f(I)$. Регулировочная характеристика генератора приведена на рис. 5.9.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

§ 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОВОМ РАСЧЕТЕ

Потери энергии в обмотках электрической машины, в активной стали, в коллекторе, в подшипниках выделяются в виде тепла и вызывают перегрев этих частей машины относительно температуры окружающей среды.

При данных размерах машины, условиях работы и классе изоляции от температуры перегрева зависит допустимая мощность машины.

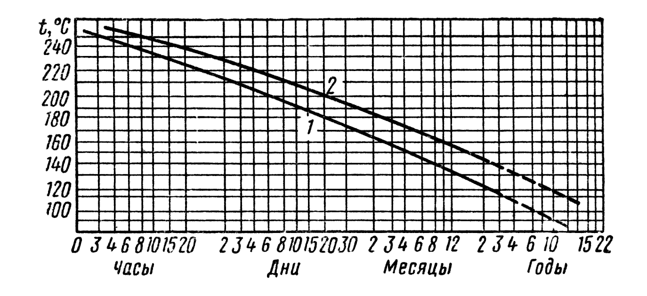


Рис. 6.1. Зависимость срока службы изоляции класса *A* от температуры ее нагрева:
1 — нижний предел; 2 — верхний предел

Нагрев машины связан также с условиями охлаждения. Чем лучше отвод тепла от машины, тем выше может быть ее мощность при прочих равных условиях. Поэтому в настоящее время почти все машины выполняют с искусственным охлаждением.

Машина по нагреву должна соответствовать ГОСТу. Проводниковые материалы (медь, алюминий) и электротехническая сталь могут длительное время работать при температуре порядка 200° С без изменения электрических, магнитных и механических свойств. Допускаемые перегревы в основном зависят от изоляционных материалов, применяемых в машине. Срок службы изоляции в случае ее нагрева выше допустимой величины значительно сокращается, а следовательно, сокращается долговечность машины. Поэтому нормы ГОСТа для машин основаны на допустимом сроке службы изоляции.

На рис. 6.1 даны кривые зависимости срока службы изоляции класса А от ее температуры. Насколько уменьшается допускаемый срок службы изоляции с увеличением температуры ее нагрева можно судить также по табл. 6.1, где приведены данные из МРТУ 16.505.019—65 на провод ПСДКТ-М, соответствующий по нагревостойкости классу Н.

Таблица 6.1

Форма сечения провода	Допустимое время эксплуатации, ч при температуре, °С			
	250	300	350	400
Круглый	1500	300	200	25
Прямоугольный	3000	1000	250	50

Если срок службы машины незначителен (например, у машин для летательных аппаратов), нормы можно превысить.

По теплостойкости изоляционные материалы согласно ГОСТ 8865—58 подразделяются на семь классов. Допустимая максимальная температура нагрева при длительном режиме работы для каждого класса дана в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Класс нагревостойкости	У	А	Е	В	F	Н	С
Допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	более 180

Эта максимальная температура изоляции не должна быть больше температуры самой нагретой точки машины.

Поскольку отдельные части машины нагреваются неравномерно, а замерить максимальную температуру в наиболее нагретом месте трудно, ГОСТ 183—55 установлены предельно допускаемые средние перегревы для различных частей электрической машины в течение продолжительного режима работы при температуре окружающего воздуха 35° С. Данные этого ГОСТа для машин с изоляционными материалами классов А и В и рекомендации МЭК (Международной электротехнической комиссии) приведены в табл. 6.3.

При тепловом расчете необходимо учитывать условия, в которых будет работать машина, — среду, температуру окружающей среды, влажность. Так, если машина будет работать в среде водорода, масла или воды, можно допустить бóльшие тепловые нагрузки, чем тогда, когда она работает в воздушной среде.

Тепловой расчет состоит в том, чтобы определить среднюю температуру перегрева отдельных частей машины: якоря, обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотки, коллектора.

Эта температура должна быть близка к допустимой. Превышение ее сокращает срок службы машины. Если же температура будет ниже допустимой, это будет свидетельствовать о том, что машина недоиспользована, электромагнитные нагрузки занижены и

Части электрической машины	По ГОСТ 183—55		По рекомендации МЭК				
	Класс изоляционного материала						
	A	B	A	E	B	F	H
Якорные обмотки, соединенные с коллектором	65	85	60	75	80	100	125
Многослойные обмотки возбуждения	65	85	60	75	80	100	125
Однорядные обмотки возбуждения	70	95	65	80	90	110	135
Обмотки возбуждения с малым сопротивлением, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	65	85	60	75	80	100	125
Стальные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками			60	75	80	100	125
Коллекторы	65	85	60	75	80	90	100

Примечания: 1. Данные МЭК для температуры окружающей среды 40° С.
2. Превышения температур для обмоток даны при измерении методом сопротивления, для коллектора и стальных сердечников — термометром.

мощность ее ниже допустимой в данных габаритах, поскольку максимальная мощность машины определяется ее нагревом.

Тепловой расчет проводится для номинального режима работы, который может быть продолжительным, кратковременным или повторно-кратковременным (это указывается в задании).

§ 6.2. ТЕПЛООТДАЧА С ПОВЕРХНОСТИ. ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУРЫ В ИЗОЛЯЦИИ

Источниками тепла в электрической машине постоянного тока являются обмотка якоря, обмотки возбуждения главных и добавочных полюсов, компенсационная обмотка и активная сталь. Тепловой поток от них благодаря внутренней теплопроводности и теплопередаче поверхностей, соприкасающихся с охлаждающей средой, отводится в охлаждающую среду.

Между охлаждающей средой и поверхностью наблюдается перепад температуры

$$\Theta_{п},\ ^{\circ}C = P_{п} \frac{1}{\alpha S_{по}}, \qquad (6.1)$$

где $P_{п}$ — количество тепла, выделяющееся с поверхности, *вт*;
$S_{по}$ — площадь поверхности охлаждения, *см*^{2};
α — коэффициент теплоотдачи, *вт*/(*см*^{2} · *град*).

Коэффициент теплоотдачи α зависит от состояния поверхности (например, лакированные поверхности рассеивают тепло в среднем на 45% больше, чем чистые металлические поверхности), ско-

рости обдувания ее и от среды (в атмосфере водорода теплоотдача с поверхности увеличивается в 1,3—1,4 раза). В дальнейшем в качестве охлаждающей среды будет приниматься воздух.

Коэффициент теплоотдачи поверхности при естественном охлаждении α, *вт/(см²·град*

Поверхности частей из меди, лакированные матовым или блестящим лаком	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$
Поверхности изоляции, лакированные матовым или блестящим лаком	$1{,}22 \cdot 10^{-3}$
Поверхность стальных сердечников, покрытая лаком	$1{,}67 \cdot 10^{-3}$
Поверхность станины и подшипниковых щитов, тонко шпаклеванная и покрытая лаковой краской	$1{,}42 \cdot 10^{-3}$

Для машин с искусственным охлаждением при обдуве поверхностей охлаждаемым воздухом коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v,\ вт/(см^2 \cdot град) = \alpha\left(1 + k_{обд}\sqrt{v}\right), \qquad (6.2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи в неподвижный воздух;
v — средняя скорость воздуха, обдувающего поверхность, *м/сек*;
$k_{обд}$ — коэффициент интенсивности обдувания.

Коэффициент интенсивности обдувания $k_{обд}$

Поверхность лобовых соединений якоря	1,0
Поверхность якоря по активной длине	0,8
Поверхность катушек возбуждения	0,8
Поверхность коллектора	0,6
Наружная поверхность станины	0,5

Поскольку на данном этапе проектирования скорость воздуха, обдувающего поверхность, неизвестна, ее задают предварительно, а после расчета вентиляции уточняют α_v. При определении α_v можно пользоваться кривыми на рис. 6.2, *а* и *б*.

Кроме перепадов температур между поверхностью и воздухом, существуют «внутренние» перепады температур, определяемые внутренней теплопроводностью материалов. Однако перепадом температуры в меди и стали вследствие их высокой теплопроводности пренебрегают и учитывают его лишь в изоляционных материалах, у которых низкая теплопроводность.

Перепад температуры в изоляции

$$\Theta_и,\ ^\circ C = P_и \frac{\delta_и}{\lambda S_и}, \qquad (6.3)$$

где $P_и$ — количество тепла, протекающего через изоляцию, *вт*;
$\delta_и$ — толщина изоляционного материала, *см*;
$S_и$ — односторонняя поверхность изоляционного материала, *см²*;
λ — коэффициент теплопроводности изоляционного материала, *вт/(см · град)*.

Если изоляция имеет несколько слоев из различных материалов, общий перепад температуры по всей толщине изоляции равен сумме перепадов в каждом слое:

$$\Theta_и,\ ^\circ C = \frac{P_и}{S_и}\left(\frac{\delta_{и1}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{и2}}{\lambda_2} + \cdots + \frac{\delta_{иn}}{\lambda_n}\right), \qquad (6.4)$$

где $\delta_{и1}, \delta_{и2}, \ldots, \delta_{иn}$ — односторонняя толщина слоя изоляции;
$\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности.

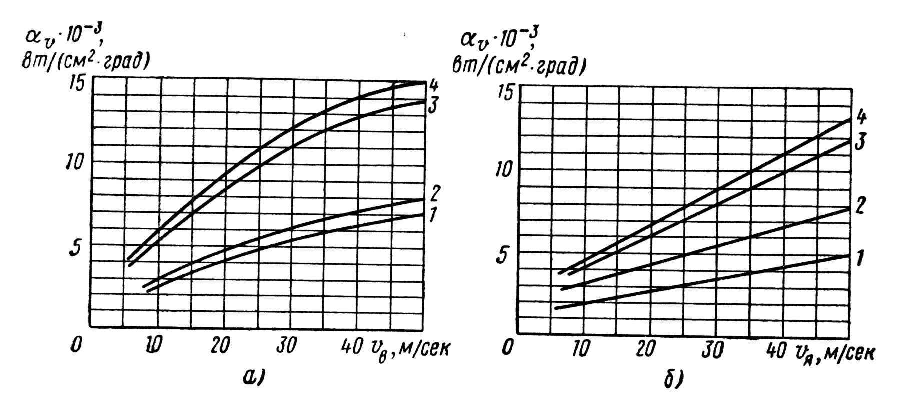


Рис. 6.2. Средние значения коэффициентов теплоотдачи:

а — при аксиальной системе вентиляции; *б* — при радиальной системе вентиляции; *1* — дуг компенсационной обмотки; *2* — наружной поверхности катушки; *3* — наружной охлаждающей поверхности полюсного наконечника; *4* — наружной поверхности якоря

Коэффициенты теплопроводности λ при $t = 20^\circ$ C, *вт/(см·град)*

Металлы и сплавы	
Алюминий	2,04
Медь	3,94
Сталь электротехническая	
вдоль листа	0,63
поперек листа 10% бумаги	0,012
Изоляционные материалы	
Асбест	0,002
Лакоткань	0,0021
Лак пропиточный	0,0025
Масло	0,0012—0,0017
Микалента	0,0026
Микафолий	0,0016
Нить хлопчатобумажная	0,0026
Слюда	0,0036
Стеклоткань	0,009
Электрокартон промасленный	0,0025
Газы	
Воздух	0,027
Неподвижный воздух в очень тонких слоях	0,00025
Водород (0° С)	0,175

Теплопроводность составной пазовой изоляции определить трудно, так как невозможно оценить размеры воздушных и основных прослоек. Поэтому перепад температур в пазовой изоляции находят по равенству (6.4), подставляя суммарную толщину (на сторону) пазовой изоляции $\delta_и$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$.

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$, *вт/см·град*

Класс изоляции А	0,001
Классы изоляции Е, В, F и Н	0,0016

§ 6.3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Тепловой расчет

Тепловой расчет проводится следующим образом.

1. Устанавливают источники тепла и величину теплового потока, численно равную мощности потерь, выделяемой в данном узле машины.

2. Устанавливают направление тепловых потоков от источника тепла к охлаждаемой воздухом поверхности.

3. Выявляют, через какие поверхности осуществляется теплопередача от источника тепла. Высчитывают размер поверхностей, участвующих в теплопередаче.

4. Определяют коэффициенты теплоотдачи α на границе с охлаждающей средой и скорость охлаждающей среды v.

5. Находят коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов λ.

6. Определяют температуру перегрева данного узла машины относительно охлаждающего воздуха внутри машины.

7. Устанавливают величину температуры перегрева воздуха внутри машины относительно температуры наружного воздуха, поступающего в машину.

Ввиду сложности теплового расчета обычно делается ряд допущений. В дальнейшем принимаются следующие допущения:

1) температура обмоток машины одинаковая для всего объема данной обмотки;

2) температура сердечника и зубцов якоря одинаковая для всего их объема;

3) температура охлаждающего воздуха одинаковая для всех параллельных путей воздухопровода (вентиляционные каналы в якоре, каналы между полюсами, воздушный зазор и др.);

4) электрические потери, выделяющиеся в активной части обмотки якоря, и потери в стали сердечника отводятся цилиндрической поверхностью якоря и поверхностью вентиляционных каналов;

5) электрические потери, выделяющиеся в лобовых частях обмотки якоря, отводятся цилиндрической поверхностью лобовых частей;

6) электрические потери, выделяющиеся в меди главных и добавочных полюсов, отводятся только наружной поверхностью станины.

Тепловые схемы замещения якоря

Наиболее наглядно тепловой процесс в электрической машине можно представить тепловыми схемами замещения по аналогии с электрическими схемами.

На основании (6.1), (6.3), (6.4) можно установить следующее соответствие между тепловыми и электрическими величинами:

1) перепад температуры Θ — падению напряжения;
2) тепловой поток ΔP_m — электрическому току;
3) тепловое сопротивление — величины $R_т = \frac{1}{\alpha S_{по}}$ и $R_т = \frac{\delta_и}{\lambda_и S_и}$

в (6.1) и (6.3) — электрическому сопротивлению.

Для составления схемы замещения рекомендуется сделать эскиз машины и на нем отметить возможные пути отвода теплового потока от источников тепла к охлаждающей среде (воздуху).

На схемах замещения источник тепла обозначают, как э. д. с. в электрических схемах; перепад температуры — буквой Θ с соответствующим индексом; направление теплового потока показывают стрелкой, величину его обозначают ΔP с индексом; тепловые сопротивления обозначают прямоугольниками, как электрические, их величину — буквой R с индексом.

После составления схемы замещения подсчитывают величины тепловых сопротивлений $R_т$.

Затем обычными приемами, применяемыми при решении электрических схем замещения, решают тепловую схему замещения. В результате получают температуру перегрева соответствующих узлов машины относительно температуры воздуха внутри машины; причем температура перегрева последних относительно наружного воздуха обтекающего машину, будет выше на величину перегрева воздуха, протекающего внутри машины, относительно температуры наружного воздуха.

Считают, что температура воздуха при прохождении через машину повышается по линейному закону. В этом случае средняя температура перегрева воздуха внутри машины

$$\Theta_{в\,ср},\ ^\circ C = \frac{t_{в2} - t_{в1}}{2}. \qquad (6.5)$$

Схема замещения якоря

Эскиз части якоря с аксиальным и радиальными вентиляционными каналами дан на рис. 6.3, *а* и *б*; стрелками показаны направления тепловых потоков.

Источниками тепла в якоре являются потери в меди обмотки якоря и потери в стали якоря.

Тепловой поток в результате потерь в меди активной части обмотки якоря передается через изоляцию проводов и пазовую изоляцию сердечнику якоря и затем через поверхности якоря и вентиляционных каналов охлаждающему воздуху; тепловой поток в ре-

зультате потерь в меди лобовой части обмотки якоря — через изоляцию лобовой части обмотки и обмоткодержатели охлаждающему воздуху.

Тепловой поток потерь в стали якоря (в сердечнике и зубцах) также передается охлаждающему воздуху через поверхности якоря и вентиляционных каналов.

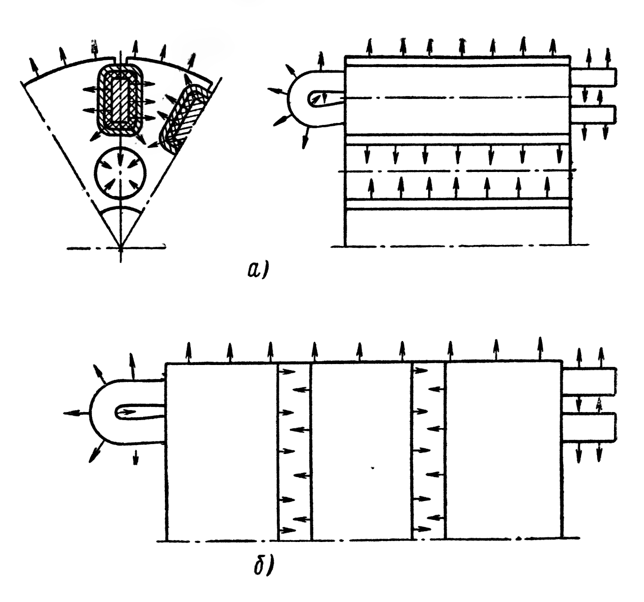


Рис. 6.3. Эскиз якоря с тепловыми потоками:
а — аксиальная система вентиляции; *б* — радиальная система вентиляции

Тепловая схема замещения якоря показана на рис. 6.4, где:

$\Delta P_{мят}$ — тепловой поток потерь в меди обмотки якоря, см. (5.3);

$\Delta P_{стят}$ — тепловой поток потерь в стали якоря, см. (5.10);

$R_{аи}$ — общее тепловое сопротивление изоляции активной части обмотки якоря;

$R_{ли}$ — общее тепловое сопротивление изоляции лобовой части обмотки якоря;

$R_{лв}$ — тепловое сопротивление при отдаче тепла наружной поверхностью изоляции лобовой части обмотки якоря воздуху;

$R_{яп}$ — тепловое сопротивление при отдаче тепла наружной поверхностью якоря воздуху;

$R_{як}$ — тепловое сопротивление при отдаче тепла поверхностью вентиляционных каналов воздуху.

§ 6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА

Тепловые сопротивления якоря

Общее тепловое сопротивление изоляции активной части обмотки якоря

$$R_{аи} = \frac{1}{S_п} \sum \frac{\delta_{иi}}{\lambda_i}. \qquad (6.6)$$

Здесь $\delta_{иi}$ — односторонняя толщина слоя изоляции обмотки якоря и паза с удельной теплопроводностью λ_i;

$S_п$ — площадь паза, *см*²,

$$S_п,\ см^2 = Z\Pi_п l_я, \qquad (6.7)$$

где Z — см. § 2.2; $l_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4;

$\Pi_п$ — периметр охлаждающей поверхности паза, *см*.

Периметр: а) для открытых пазов с креплением обмотки бандажом (см. рис. 2.9)

$$\Pi_п,\ см = 2h_п + b_п, \qquad (6.8а)$$

где $b_п$, $h_п$ — см. (2.32), (2.33);

б) для открытых пазов с креплением обмотки клиньями (см. рис. 2.10)

$$\Pi_п,\ см = 2(h_п + 0{,}66 b_п), \qquad (6.8б)$$

где $b_п$, $h_п$ — см. (2.32), (2.33);

Рис. 6.4. Тепловая схема замещения якоря

в) для полузакрытых овальных пазов (см. рис. 2.12)

$$\Pi_п,\ см = \pi(0{,}66 r_1 + r_2) + 2h_1, \qquad (6.8в)$$

где r_1, r_2 — см. (2.23), (2.24); h_1 — см. (2.25);

г) для круглых пазов (см. рис. 2.13)

$$\Pi_п,\ см = \pi d_п, \qquad (6.8г)$$

где $d_п$ — см. (2.37).

Тепловое сопротивление при отдаче тепла наружной поверхностью якоря

$$R_{яп} = \frac{1}{\alpha S_{яп}}, \qquad (6.9а)$$

где α — см. стр. 136.

$S_{яп}$ — наружная поверхность якоря, *см*².

При аксиальной вентиляции

$$S_{яп},\ см^2 = \pi D_я (l_я - 0{,}5 \sum l_{бя}), \qquad (6.10а)$$

где $D_я$, $l_я$ — см. § 1.4;

$\Sigma l_{бя}$ — общая ширина по длине якоря проволочных бандажей (определяется по эскизу).

При радиальной вентиляции

$$S_{яп} = \pi D_я (l_я - 0{,}5 \sum l_{бя} - П_р b_р^{'}), \quad (6.10б)$$

где

$\Sigma l_{бя}$ — см. (6.10а).

Тепловое сопротивление при отдаче тепла поверхностью вентиляционных каналов

$$R_{як} = \frac{1}{\alpha S_{як}}, \quad (6.9б)$$

где α — см. стр. 136.

$S_{як}$ — поверхность вентиляционных каналов.

При аксиальной системе вентиляции

$$S_{як} = 0{,}2 n_а П_а (l_я - 0{,}5 \sum l_{бя}), \quad (6.11а)$$

где $n_а$ — число аксиальных вентиляционных каналов;

$П_а$ — периметр поперечного сечения аксиального вентиляционного канала, *см*.

Для круглых каналов

$$П_а, \ см = \pi d_а,$$

где $d_а$ — диаметр аксиального канала, *см*.

При радиальной системе вентиляции

$$S_{як}, \ см^2 = \frac{2\pi (D_я - d_в)^2}{2} n_р, \quad (6.11б)$$

где $d_в$ — диаметр вала, см. (3.10);

$n_р$ — число радиальных вентиляционных каналов, см. (1.12б).

Общее тепловое сопротивление изоляции лобовой части обмотки якоря

$$R_{ли} = \frac{\sum \delta_{ли}}{\lambda_{экв} S_{ли}} \quad (6.12)$$

где $\sum \delta_{ли}$ — односторонняя толщина внешней изоляции катушек лобовой части обмотки якоря, *см*;

$\lambda_{экв}$ — см. стр. 138;

$S_{ли}$ — поверхность изоляции лобовых соединений обмотки якоря.

При отсутствии аксиальных вентиляционных каналов

$$S_{ли}, \ см^2 = 2\pi D_я (l_{выл} - 0{,}3 \sum l_{бл}), \quad (6.13а)$$

где $D_я$ — см. § 1.3, п. 8, § 1.4;

$l_{выл}$ — вылет лобовой части обмотки якоря с одной стороны;

$\sum l_{бл}$ — суммарная ширина проволочных бандажей по длине вылета на одну сторону лобовых соединений, *см.*

При наличии аксиальных вентиляционных каналов

$$S_{ли},\ см^2 = 2\pi\left(D_я - \frac{1}{2} h_п\right)\left(2\sum l_{выл} - 0{,}3\sum l_{бл} - 0{,}3\sum l_{од} + h_п\right), \quad (6.13б)$$

где $h_п$ — см. (2.26), (2.33), (2.38);

$\sum l_{од}$ — общая ширина обмоткодержателей (определяется по эскизу).

Можно принимать

$$l_{выл} = 0{,}3\tau \text{ при } 2p = 2$$

$$l_{выл} = 0{,}4\tau \text{ при } 2p \geqslant 4,$$

где τ — см. (1.13).

Тепловое сопротивление при отдаче тепла от наружной поверхности изоляции лобовой части обмотки якоря воздуху

$$R_{лв} = \frac{1}{\alpha_v S_{ли}}, \quad (6.14)$$

где α_v — см. (6.2), $S_{ли}$ — см. (6.13а).

Температура перегрева

В результате расчета цепи замещения якоря определяют температуру перегрева обмотки якоря относительно средней температуры перегрева воздуха внутри машины

$$\Theta_{мя},\ ^\circ C = \frac{\Delta P_{мят} + \Delta P_{стят}\dfrac{R_{яп}R_{як}}{R_{яп}R_{як} + R_{аи}(R_{яп} + R_{як})}}{\dfrac{R_{яп} + R_{як}}{R_{яп}R_{як} + R_{аи}(R_{яп} + R_{як})} + \dfrac{1}{R_{ли} + R_{лв}}}. \quad (6.15)$$

Температура перегрева обмотки якоря относительно температуры наружного воздуха, входящего в машину,

$$\Theta'_{мя} = \Theta_{мя} + \Theta_{вср} \quad (6.16)$$

не должна быть выше допускаемой для принятого класса изоляции обмотки якоря.

§ 6.5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ВЕНТИЛЯЦИИ

Охлаждение машин может осуществляться естественным путем, при котором тепло с поверхности машин отводится в окружающую среду без вспомогательных средств (благодаря теплопроводности,

теплоизлучению и конвекции), и искусственным путем — с помощью вентилятора, укрепленного на валу машины, или путем продува охлаждающей среды вентилятором или насосом, помещенным вне машины (см. гл. I).

В настоящее время с естественным охлаждением изготавливают лишь электродвигатели малой мощности с $D_я < 10$ *см*, электродвигатели с кратковременным режимом работы и открытые машины.

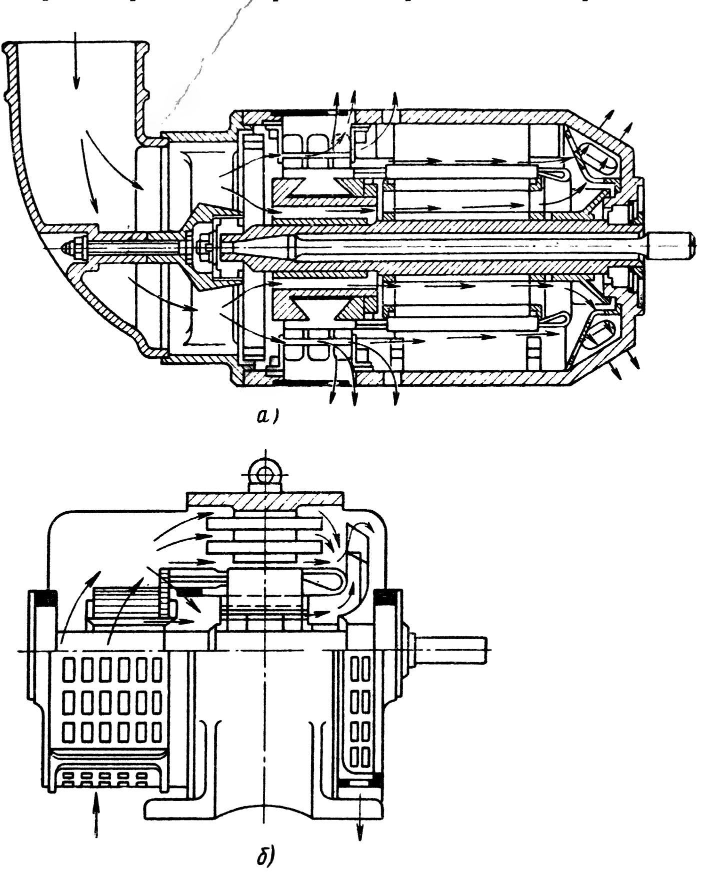


Рис. 6.5. Машина с аксиальной системой охлаждения:
а — для летательных аппаратов; *б* — общего применения

В основном машины постоянного тока изготавливают с самоохлаждением; защищенные — с проточной вентиляцией, закрытые — с проточной и замкнутой (см. гл. I). Генераторы для летательных аппаратов мощностью более 1,5 *квт* выполняют с продувом.

При искусственной системе охлаждения в качестве охлаждающей среды используют не только воздух, но и другие газы (водород, гелий, водяной пар и т. п.) и жидкости (вода, масло и т. п.). (Далее будет рассматриваться только воздушное охлаждение.)

В зависимости от направления охлаждающего потока воздуха системы охлаждения подразделяются на: а) аксиальную — поток вдоль машины (рис. 6.5, *а* и *б*); б) радиальную — поток поперек машины (рис. 6.6) и в) аксиально-радиальную. Большее распространение получила аксиальная система охлаждения (см. рис. 6.5, *а*).

С радиальной системой вентиляции выполняют в основном мощные машины.

При расчете вентиляции осуществляют следующее:

1) выбор системы вентиляции;

2) определение количества охлаждающего воздуха;

3) определение требуемого напора, расчет воздухопровода машины;

4) расчет вентилятора, в результате которого определяют размеры вентилятора и потребляемую им мощность и уточняют величину требуемого расхода воздуха и напора вентилятора.

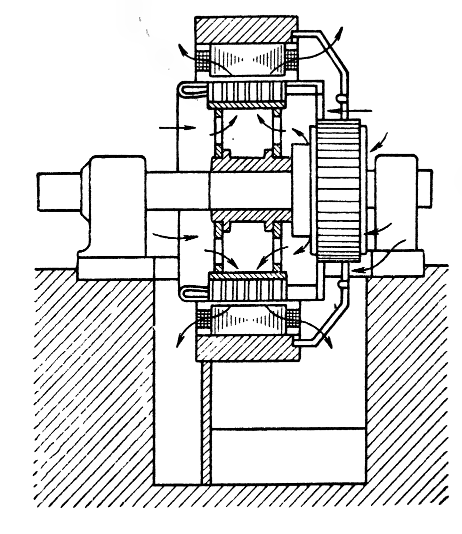


Рис. 6.6. Машина с радиальной системой охлаждения

§ 6.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Количество охлаждающего воздуха определяется потерями в машине и допустимым перегревом

$$Q_{в},\ м^3/сек = \frac{10^3 \sum \Delta P'}{\rho c_p \Theta_{в}}. \qquad (6.17)$$

Здесь $\sum \Delta P'$ — сумма потерь в машине при нагрузке без потерь в подшипниках (тепло от них отводится через масло или непосредственно), *квт*, см. (5.2);

c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении 1,01325 *бар* или 760 *мм рт. ст.*, $\frac{дж}{кг \cdot град}$;

$\Theta_{в}$ — температура перегрева воздуха в машине, °C,

$$\Theta_{в} = t_{в2} - t_{в1};$$

ρ — плотность воздуха при давлении p и температуре T,

$$\rho,\ кг/м^3 = \rho_0 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}, \qquad (6.18)$$

где $\rho_0 = 1{,}293$ *кг/м*³ — плотность воздуха при давлении $p_0 = 760$ *мм рт. ст.* (101 325 *н/м*²) и температуре $T_0 = 273{,}15°$ K (0° C)

$$T = 273 + t;$$

откуда

$$t,\ °C = \frac{t_{в1} + t_{в2}}{2},$$

где $t_{в1}$ — температура поступающего в машину холодного воздуха, 0° C;

$t_{в2}$ — температура выходящего из машины воздуха, 0° C.

Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении *C_p, дж/(кг·град)*

при —50° C	1013
при —20° C	1011
при 0° C	1006
при 100° C	1011

Плотность воздуха ρ, *кг/м*³

при —50° C	1,384
при —30° C	1,453
при —10° C	1,342
при 0° C	1,193
при 5° C	1,270
при 10° C	1,247
при 15° C	1,226
при 20° C	1,205
при 30° C	1,165
при 50° C	1,093
при 100° C	0,946
при 200° C	0,746

Температура перегрева воздуха в машине $\Theta_в$ зависит от типа вентиляции и от превышения температуры обмоток.

Предварительно можно задаться $\Theta_в$ по зависимостям $\Theta_в = f(\Theta_{обм})$ для аксиальной и радиальной систем вентиляции, которые представлены на рис. 6.7.

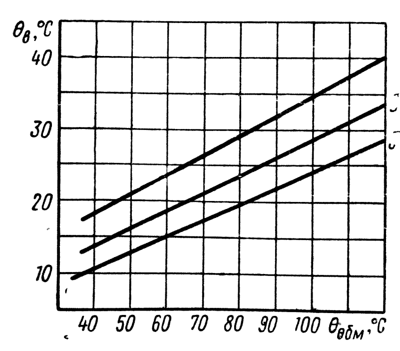


Рис. 6.7. Зависимость $\Theta_в = f(\Theta_{обм})$ для радиальной и аксиальной систем вентиляции:

1 — аксиальная система вентиляции с аксиальными каналами в сердечнике якоря и коллекторе; *2* — аксиальная система вентиляции без аксиальных каналов; *3* — радиальная система вентиляции

§ 6.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПОРА

Напор (давление) H, необходимый для прохождения через машину воздуха согласно (6.17), равен динамическому (скоростному) напору воздуха $H_{\text{дин}}$ плюс статическому напору $H_{\text{ст}}$:

$$H,\ н/м^2 = H_{\text{дин}} + H_{\text{ст}}. \tag{6.19}$$

1. Динамический напор на выходе

$$H_{\text{дин}},\ н/м^2 = \rho \frac{v^2}{2}, \tag{6.20}$$

где ρ — плотность воздуха, $кг/м^3$; см. (6.18).

Скорость движущегося воздуха

$$v,\ м/сек = \frac{Q_{\text{в}}}{S}, \tag{6.21}$$

где $Q_{\text{в}}$ — см. (6.17);

S — поперечное сечение выходного отверстия, $м^2$.

С учетом (6.21) формула (6.20) может быть представлена в виде

$$H_{\text{дин}},\ н/м^2 = \rho \frac{Q_{\text{в}}^2}{2S^2}. \tag{6.22}$$

При нормальных условиях — температуре воздуха $t = 20°$ С, давлении $p = 760$ *мм рт. ст.*, $\rho = 1{,}2$ $кг/м^3$ — расчет скоростного напора производят по формуле

$$H_{\text{дин}},\ н/м^2 = 0{,}6 \frac{Q_{\text{в}}^2}{S^2}. \tag{6.23}$$

2. Статический напор определяется через потери статического напора на отдельных участках воздухопровода машины.

Потери статического напора на отдельных участках $H_{\text{ст}\,n}$ выражаются через динамический напор на данном участке и коэффициент γ, называемый коэффициентом аэродинамического сопротивления:

$$H_{\text{ст}\,n},\ н/м^2 = \gamma H_{\text{дин}}, \tag{6.24}$$

где $H_{\text{дин}}$ — см. (6.20), (6.22), (6.23).

Коэффициент аэродинамического сопротивления γ для различных типов воздухопровода определяется опытным путем. Рекомендуемые значения коэффициента γ даны в табл. 6.4.

При относительно длинных каналах малых сечений (в сердечнике якоря, в коллекторе) следует учитывать коэффициент сопротивления от трения о стенки воздухопровода по формуле

$$\gamma = 0{,}05 \frac{l}{d},$$

где l — длина канала, *м*;

d — диаметр канала (или эквивалентный диаметр), *м*.

Таблица 6.4

Элементы пути	Форма канала	γ
Вход в канал с острыми краями		0,8
Вход в патрубок с закругленными краями		0,25 при $r = (0{,}25-0{,}5)\,d$
Вход в канал — внезапное сужение		$0{,}7\left(1-\frac{S_1}{S_2}\right)$
Выход из канала — внезапное расширение		$\left(1-\frac{S_1}{S_2}\right)^2$
Постепенное сужение		0,1
Переход из аксиального канала в радиальный — внезапный поворот		1,0
Поворот под углом (края острые)		при угле β 90° — 1,0 135° — 0,5

Для каналов некруглой формы эквивалентным диаметром можно считать диаметр круга, равного по площади рассматриваемому сечению.

В общем случае статические потери напора на отдельных участках определяются по формуле

$$H_{\text{ст}\,n},\ н/м^2 = \gamma\rho\,\frac{Q_{\text{в}}^2}{2S_n^2}\,, \qquad (6.25)$$

где S_n — поперечное сечение отдельного участка, $м^2$.

При нормальных условиях

$$H_{\text{ст}\,n},\ н/м^2 = 0{,}6\gamma\,\frac{Q_{\text{в}}^2}{S_n^2}\,. \qquad (6.26)$$

При вычислении аэродинамического сопротивления для внезапного расширения или сужения воздухопровода следует подставлять в (6.25), (6.26) значение меньшего сечения.

В общем случае статические потери на отдельных участках $H_{\text{ст}\, n}$ выражают как

$$H_{\text{ст}\, n},\ н/м^2 = Z_n Q_{\text{в}}^2, \tag{6.27}$$

где Z_n — аэродинамическое сопротивление участков воздухопровода, $н \cdot сек^2/м^8$, аналогичное активному сопротивлению электрической цепи,

$$Z_n,\ \frac{н \cdot сек^2}{м^8} = \gamma \frac{\rho}{2S_n^2}. \tag{6.28}$$

При нормальных условиях

$$Z_n,\ \frac{н \cdot сек^2}{м^8} = 0{,}6\gamma \frac{1}{S_n^2}. \tag{6.29}$$

Общий (суммарный) статический напор воздухопровода

$$H_{\text{ст}},\ н/м^2 = Z Q_{\text{в}}^2, \tag{6.30}$$

где Z — аэродинамическое сопротивление всего воздухопровода.

Статический напор рассчитывают следующим образом:

а) вычисляют Z_n воздухопровода по (6.28) или (6.29);

б) определяют аэродинамическое сопротивление всего воздухопровода Z (см. § 6.8);

в) определяют статический напор $H_{\text{ст}}$ по (6.30).

§ 6.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХОПРОВОДА

Для того чтобы определить аэродинамическое сопротивление воздухопровода, следует вычертить эскиз воздухопровода машины, который в общем случае представляет собой сложную цепь последовательно и параллельно следующих друг за другом каналов.

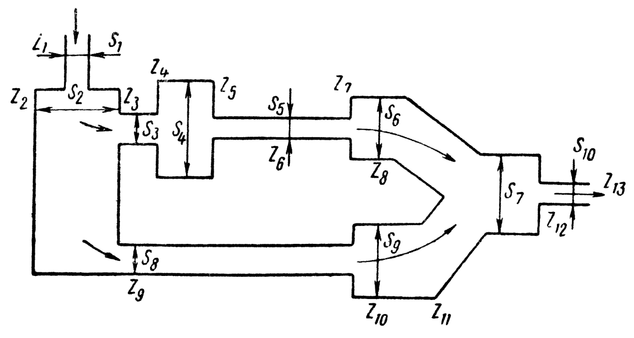


Рис. 6.8. Эскиз воздухопровода машины

На рис. 6.8 приведен эскиз воздухопровода машины с аксиальной системой вентиляции. В соответствии с распределением воздушных струй в машине, изображенным на эскизе, составляют схему замещения вентиляционной системы (рис. 6.9) и таблицу, характеризующую отдельные участки воздухопровода (табл. 6.5).

После нахождения аэродинамических сопротивлений отдельных участков Z_n определяют общее (эквивалентное) аэродинамическое сопротивление всего воздухопровода.

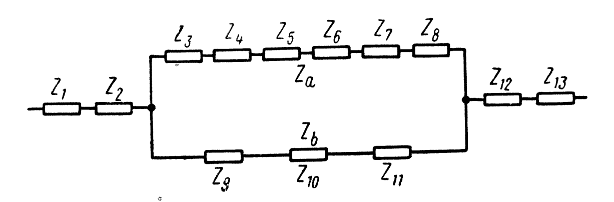


Рис. 6.9. Схема замещения вентиляционной системы машины

Этот расчет производят по той же форме, что и расчет эквивалентного сопротивления сложной электрической цепи.

Аэродинамическое сопротивление последовательно соединенных участков воздухопровода

$$Z_{\text{посл}} = \sum_{1}^{n} Z_n. \tag{6.31}$$

Аэродинамическое сопротивление параллельно соединенных участков воздухопровода

$$Z_{\text{пар}} = \frac{1}{\left(\sum_{1}^{n} \sqrt{\frac{1}{Z_n}}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{Z_n}}\right)^2}. \tag{6.32}$$

Практически во многих случаях в электрической машине имеется только два параллельных воздушных участка ($n=2$). При этом выражение (6.32) получит следующий вид:

$$Z_{\text{пар}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}}\right)^2} = \frac{Z_1 Z_2}{(\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2})^2}. \tag{6.33}$$

Далее приводится расчет сложного воздухопровода, эскиз и схема замещения которого даны на рис. 6.8 и 6.9.

Сопротивление последовательно соединенных участков воздухопровода

$$Z_{\text{посл}} = Z_1 + Z_2 + Z_{12} + Z_{13}.$$

Таблица 6.5

Обозначение на рис. 6.8 и 6.9	Наименование участка	Причина сопротивления	Сечение, $м^2$	Коэффициент α	Аэродинамическое сопротивление Z, $\frac{н \cdot сек^2}{м^8}$
			Общая струя		
Z_1	Вход воздуха через подшипниковый щит	Вход в отверстие с острыми краями	S_1 — сечение отверстий для входа воздуха	0,8	$0{,}8 \cdot \frac{0{,}6}{S_1^2}$
Z_2	Вход в камеру над коллектором	Расширение	S_2 — сечение камеры над коллектором	$\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$	$\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{0{,}6}{S_1^2}$
			Цепь якоря		
Z_3	Вход в петушки коллектора	Поворот под углом 90°	S_3 — сечение промежутков между петушками	1,0	$\frac{0{,}6}{S_3^2}$
Z_4	Вход в камеру между коллектором и якорем	Расширение	S_4 — сечение камеры между коллектором и якорем	$\left(1 - \frac{S_3}{S_4}\right)^2$	$\left(1 - \frac{S_3}{S_4}\right) \cdot \frac{0{,}6}{S_3^2}$
Z_5	Вход в аксиальные каналы якоря	Сужение	S_5 — сечение аксиальных каналов	$0{,}7\left(1 - \frac{S_5}{S_4}\right)$	$0{,}7\left(1 - \frac{S_5}{S_4}\right) \frac{0{,}6}{S_5^2}$
Z_6	Аксиальные каналы якоря	Трение	S_5 — сечение аксиальных каналов	$0{,}05 \frac{l}{d}$	$0{,}05 \frac{l}{d} \frac{0{,}6}{S_5^2}$
Z_7	Выход из каналов якоря под лобовые соединения якоря	Расширение	S_6 — сечение камеры под лобовыми отверстиями	$\left(1 - \frac{S_5}{S_6}\right)^2$	$\left(1 - \frac{S_5}{S_6}\right)^2 \frac{0{,}6}{S_5^2}$

Продолжение табл. 6.5

Обозначение на рис. 6.8 и 6.9	Наименование участка	Причина сопротивления	Сечение, $м^2$	Коэффициент α	Аэродинамическое сопротивление $Z, \frac{н \cdot сек^2}{м^8}$
Z_8	Вход в камеру вентилятора	Изменение направления потока воздуха; поворот под углом 135°	S_7 — сечение камеры вентилятора	0,5	$0{,}5\frac{0{,}6}{S_7^2}$
		Цепь станины			
Z_9	Вход в пространство между катушками	Поворот под углом 90°	S_8 — сечение пространства между катушками	1	$1 \cdot \frac{0{,}6}{S_8^2}$
Z_{10}	Выход в камеру подшипникового щита	Расширение	S_9 — сечение камеры заднего подшипникового щита	$\left(1-\frac{S_8}{S_9}\right)^2$	$\left(1-\frac{S_8}{S_9}\right)^2\frac{0{,}6}{S_8^2}$
Z_{11}	Вход в камеру вентилятора	Изменение направления потока воздуха; поворот под углом 135°	S_7 — сечение камеры вентилятора	0,5	$0{,}5\frac{0{,}6}{S_7^2}$
		Выход воздуха из машины			
Z_{12}	Вход в сетку подшипникового щита	Вход в отверстие с острыми краями	S_{10} — сечение отверстий	0,8	$0{,}8\frac{0{,}6}{S_8^2}$
Z_{13}	Выход воздуха в атмосферу	Потери скоростного давления	S_{10} — сечение отверстий сетки	1,0	$\frac{0{,}6}{S_{10}^2}$

Сопротивление последовательно соединенных участков одной параллельной ветви

$$Z_a = Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8;$$

другой параллельной ветви

$$Z_b = Z_9 + Z_{10} + Z_{11};$$

отсюда

$$Z_{\text{пар}} = \frac{(Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8)(Z_9 + Z_{10} + Z_{11})}{(\sqrt{Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8} + \sqrt{Z_9 + Z_{10} + Z_{11}})^2}.$$

Эквивалентное аэродинамическое сопротивление всего воздухопровода

$$Z = Z_{\text{посл}} + Z_{\text{пар}} = Z_1 + Z_2 + Z_{12} + Z_{13} +$$
$$+ \frac{(Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8)(Z_9 + Z_{10} + Z_{11})}{(\sqrt{Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8} + \sqrt{Z_9 + Z_{10} + Z_{11}})^2}.$$

§ 6.9. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯТОРА

Из двух типов вентиляторов — центробежных и осевых (пропеллерных) — наиболее распространены в электрических машинах центробежные.

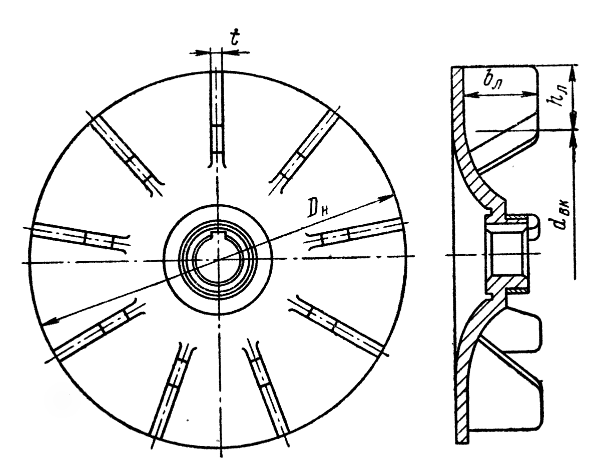


Рис. 6.10. Эскиз центробежного вентилятора

Для реверсивных машин применяют вентиляторы с радиальными лопатками, для нереверсивных — с наклонными. Чаще используют вентиляторы с радиальными лопатками, так как они проще.

Далее рассмотрен расчет центробежного вентилятора.

Порядок расчета следующий:

1. Определяют основные размеры вентилятора (см. рис. 6.10): наружный диаметр $D_н$, внутренний диаметр колеса вентилятора $d_{вк}$, ширина лопаток вентилятора $b_л$, число лопаток $N_л$.

2. Строят характеристику вентилятора $H=f(Q_в)$, где H — напор, $Q_в$ — количество охлаждающего воздуха, и характеристику воздухопровода машины $H=ZQ_в^2$.

3. На основании построенных характеристик находят уточненное значение расхода воздуха $Q_в$ и напора вентилятора $H_в$.

4. Определяют мощность, потребляемую вентилятором $P_в$.

5. Уточняют размеры вентилятора.

1. *Предварительное определение размеров вентилятора* (см. рис. 6.10).

а) Внешний диаметр вентилятора $D_н$ выбирают максимально возможным по конструктивным соображениям, так чтобы между ним и внутренним диаметром подшипникового щита зазор был небольшим:

$$\delta_{вп} \cong (0,1 \div 0,2) D_н.$$

б) Внутренний диаметр колеса вентилятора

$$d_{вк},\ см \cong (0,65 - 0,8) D_н, \tag{6.34}$$

где $D_н$ — см. п. а.

в) Ширина лопатки

$$b_л,\ см \cong 0,15 D_н, \tag{6.35}$$

г) Высота лопатки

$$h_л,\ см = \frac{D_н - d_{вк}}{2}, \tag{6.36}$$

где $D_н$ — см. п. а.; $d_{вк}$ — см. (6.34).

д) Число лопаток

$$N_л = \pi \frac{D_н + d_{вк}}{D_н - d_{вк}}, \tag{6.37}$$

где $D_н$ — см. п. а.; $d_{вк}$ — см. (6.34).

е) Окружные скорости по внутреннему и наружному диаметрам лопаток, *м/сек*:

$$v_1 = \frac{\pi d_{вк} n}{6000}, \quad v_2 = \frac{\pi D_н n}{6000}, \tag{6.38}$$

где $D_н$ — см. п. а.; $d_{вк}$ — см. (6.34); n — см. задание.

2. *Определение характеристики вентилятора*

$$H = f(Q_в).$$

Для упрощения расчета пользуются двумя точками характеристики вентилятора.

а) Определяют напор вентилятора при $Q_в=0$ (входные отверстия закрыты, как бы режим холостого хода):

$$H_0,\ н/м^2=\eta_{a0}\rho(v_2^2-v_1^2), \qquad (6.39)$$

где η_{a0} — аэродинамический к. п. д. вентилятора при холостом ходе;

$\eta_{a0}=0,6$ — вентиляторы с радиальными лопатками;

$\eta_{a0}=0,75$ — вентиляторы с лопатками, наклоненными по направлению вращения вентилятора;

$\eta_{a0}=0,5$ — вентиляторы с лопатками, отогнутыми против направления вращения вентилятора;

ρ — плотность воздуха, *кг/м*³.

б) Определяют максимально возможное для вентилятора количество воздуха $Q_{в\,max}$ при $H=0$ (вентилятор работает непосредственно в атмосферу, как бы режим короткого замыкания).

Для вентилятора с радиальными лопатками

$$Q_{в\,max},\ м^3/сек=0,42v_2S_2, \qquad (6.40)$$

где S_2 — входное сечение вентилятора, *м*²,

$$S_2=0,92\pi D_н b_л\cdot 10^{-4}.$$

в) Строят характеристику вентилятора.

Для вентилятора с радиальными лопатками характеристика вентилятора

$$H=H_0\left[1-\left(\frac{Q_в}{Q_{в\,max}}\right)^2\right]. \qquad (6.41)$$

г) На том же графике, где построена характеристика вентилятора $H=f(Q_в)$, строят характеристику воздухопровода $H=ZQ_в$ (рис. 6.11).

д) Находят точку пересечения характеристик. Эта точка M определяет истинный расход воздуха $Q_в$ и напор вентилятора H.

е) Определяют истинный расход воздуха $Q_в$ и напор вентилятора.

Истинный расход воздуха можно найти аналитически согласно равенств (6.30) и (6.41):

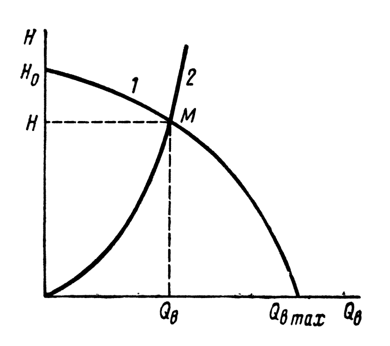


Рис. 6.11. Характеристика вентилятора (*1*) и вентиляционной системы (*2*)

$$Q_в,\ м^3/сек=Q_{в\,max}\sqrt{\frac{H_0}{H_0+ZQ_{в\,max}^2}}, \qquad (6.42)$$

где $Q_{\text{в max}}$ — см. (6.31); H_0 — см. (6.30);
Z — см. § 6.7.

Истинный напор

$$H_и,\ н/м^2 = \frac{H_0 Z Q^2_{\text{в max}}}{H_0 + Z Q^2_{\text{в max}}}. \tag{6.43}$$

Максимальное значение к. п. д. вентилятора имело место при расходе воздуха

$$Q_в = \frac{Q_{\text{в max}}}{2} \tag{6.44}$$

и напоре

$$H = 0{,}75 H_0. \tag{6.45}$$

Эти соотношения можно использовать и при выборе размеров вентилятора. При выбранном диаметре вентилятора $D_н$ из (6.35) определяют ширину лопатки $b_л$, а из (6.39) и (6.34) определяют скорость внутреннего края лопатки v и внутренний диаметр $d_{вк}$. Число лопаток выбирают по (6.37).

3. *Определение мощности, потребляемой вентилятором,*

$$P_в,\ вт = \frac{H_и Q_в}{\eta_э}, \tag{6.46}$$

где $H_и$ — см. (6.43); $Q_в$ — см. (6.42);
$\eta_э = 0{,}15 \div 0{,}20$ — энергетический к. п. д. вентилятора.

4. *Уточнение размеров вентилятора.*

а) Окружная скорость на внутреннем диаметре колеса вентилятора из (6.39)

$$v_1,\ м/сек = \sqrt{v_2^2 - \frac{H_0}{\eta_{а0}\rho}}, \tag{6.47}$$

где H_0 — см. (6.39).

б) Внутренний диаметр колеса вентилятора

$$d_{вк},\ см = \frac{6000 v_1}{\pi n}, \tag{6.48}$$

где v_1 — см. (6.47); n — см. § 1.3, п. 5.

в) Высота лопаток

$$h_л,\ см \quad \frac{D_н - d_{вк}}{2}, \tag{6.49}$$

где $D_н$ — см. § 6.9; $d_{вк}$ — см. (6.48).

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Техническое задание

Рассчитать электродвигатель общего применения мощностью 8 *квт* на напряжение 220 *в*, скорость вращения 1500 *об/мин*. Режим работы длительный, возбуждение смешанное, обмотка последовательная стабилизирующая (легкая). Исполнение защищенное с самовентиляцией. Изоляция класса В.

Выбор главных размеров электродвигателя (§ 1.3—1.5)

1. Принимаем предварительное значение к. п. д. по рис. 1.25

$$\eta = 84{,}5\%.$$

2. Ток электродвигателя по (1.7б)

$$I_1 = \frac{P_{2н}}{\eta U_н} \cdot 10^3 = \frac{8{,}0 \cdot 10^3}{0{,}845 \cdot 220} = 43{,}2\ а.$$

3. Ток якоря по (1.8б), если принять ток в параллельной (шунтовой) обмотке

$$I_ш = 0{,}037 \cdot I_1 = 0{,}037 \cdot 43{,}2 = 1{,}6\ а,$$

$$I_я = I_1 - I_ш = 43{,}2 - 1{,}6 = 41{,}6\ а.$$

4. Электромагнитная мощность по (1.6а)

$$P_э = P_{2н} \frac{100 + \eta}{2\eta} = 8{,}0 \frac{100 + 84{,}5}{2 \cdot 84{,}5} = 8{,}7\ квт.$$

5. Отношение

$$\frac{P_э}{n} = \frac{8{,}7}{1500} = 5{,}8 \cdot 10^{-3}\ квт/об/мин.$$

6. Выбираем $D_я$ по кривым рис. 1.28, *а*:

$$D_я = 16{,}2\ см.$$

7. Проверяем величину окружной скорости вращения якоря по (1.4) и рекомендуемым значениям в § 1.3, п. 5.

$$v_я = \frac{\pi D_я n \cdot 10^{-2}}{60} = \frac{\pi \cdot 16{,}2 \cdot 1500 \cdot 10^{-2}}{60} = 12{,}7\ м/сек.$$

8. Выбираем значения A и B_δ по кривым рис. 1.15 и 1.18 и α_i по рекомендациям § 1.3, п. 3:

$$A = 203\ а/см; \quad B_\delta = 0{,}715\ тл; \quad \alpha_i = 0{,}64.$$

9. Определяем значение расчетной длины якоря по (1.9):

$$l_i = \frac{6{,}1 \frac{P_э}{n} \cdot 10^7}{\alpha_i A B_\delta D_я^2} = \frac{6{,}1 \cdot 5{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 10^7}{0{,}64 \cdot 203 \cdot 0{,}715 \cdot 16{,}2^2} = 14{,}4 \text{ см}.$$

Принимаем аксиальную систему вентиляции, тогда по (1.12а), округляя l_i, получаем

$$l_я = l_i = 14 \text{ см}.$$

10. Подсчитываем отношение расчетной длины якоря к диаметру (см. § 1.3, п. 4):

$$\lambda_я = \frac{l_i}{D_я} = \frac{14}{16{,}2} = 0{,}864.$$

Полученное соотношение несколько больше рекомендуемого для $n = 1500$ *об/мин* (см. рис. 1.23). Однако, учитывая целесообразность снижения махового момента якоря, значение $\lambda_я = 0{,}864$ будем считать приемлемым.

11. Выбираем число полюсов по § 1.5, п. 1:

$$2p = 4.$$

12. Полюсное деление по (1.13)

$$\tau = \frac{\pi D_я}{2p} = \frac{\pi \cdot 16{,}2}{4} = 12{,}72 \text{ см}.$$

Эта величина соответствует рекомендуемой в § 1.5, п. 2.

13. Расчетная ширина полюсной дуги по (1.15)

$$b_{iгн} = \alpha_i \tau = 0{,}64 \cdot 12{,}72 = 8{,}14 \text{ см}.$$

14. Воздушный зазор под главным полюсом по рис. 3.3

$$\delta = 0{,}12 \text{ см}.$$

15. Действительная ширина полюсного наконечника по (1.14)

$$b_{гн} = b_{iгн} - 2\delta = 8{,}14 - 2 \cdot 0{,}12 = 7{,}9 \text{ см}.$$

16. Проверяем значение α_i:

$$\alpha_i = \frac{b_{iгн}}{\tau} = \frac{8{,}14}{12{,}72} = 0{,}64.$$

Выбор и расчет обмотки якоря (§ 2.1, 2.2)

17. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$ (см. рис. 2,6, *б*).

18. Ток параллельной ветви по (2.1)

$$i_я = \frac{I_я}{2a} = \frac{41,6}{2} = 20,8\ a.$$

19. Число эффективных проводов по (2.2)

$$N_я = \frac{\pi D_я A}{i_я} = \frac{\pi \cdot 16,2 \cdot 203}{20,8} = 498.$$

Согласно условиям выполнения обмотки принимаем $N_я = 496$; число витков в обмотке якоря $w_я = 248$.

20. Число секционных сторон в пазу (см. § 2.2, п. 6)

$$u_п = 3.$$

21. Число витков в секции якоря (см. § 2.2, п. 4) $w_{ся} = 8/3$, (3—2—3 — число витков соответственно в секциях 1, 2, 3).

22. Уточняем линейную нагрузку якоря по (2.7):

$$A = \frac{N_я i_я}{\pi D_я} = \frac{496 \cdot 20,8}{\pi \cdot 16,2} = 202,8\ a/см.$$

23. Число коллекторных пластин по (2.4).

$$K = \frac{N_я}{2w_{ся}} = \frac{496}{2 \cdot \frac{8}{3}} = 93.$$

24. Число пазов по (2.6) и § 2.2, п. 7.

$$Z = \frac{K}{u_п} = \frac{93}{3} = 31.$$

25. Число эффективных проводов в пазу по (2.8)

$$N_п = \frac{N_я}{Z} = \frac{496}{31} = 16.$$

26. Объем тока в пазу (см. § 2.2, п. 8).

$$i_я N_п = 20,8 \cdot 16 = 333,3\ a.$$

27. Шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг по (2.10а)

$$y = y_к = \frac{K-1}{p} = \frac{93-1}{2} = 46.$$

Первый частичный шаг по (2.10)

$$y_1 = \frac{K}{2p} + \varepsilon = \frac{93}{4} + 0,75 = 24.$$

Второй частичный шаг по (2.10).

$$y_2 = y - y_1 = 46 - 24 = 22.$$

28. Шаг по пазам согласно (2.11)

$$y_п = \frac{y_1}{u_п} = \frac{24}{3} = 8.$$

29. Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря (см. § 2.4, п. 1). По рис. 2.8

$$Aj_я = 1460 \frac{a}{см} \cdot \frac{a}{мм^2};$$

тогда

$$j_я = \frac{1460}{202,8} = 7,15\ a/мм^2.$$

30. Сечение эффективного провода по (2.16)

$$q_я = \frac{i_я}{j_я} = \frac{20,8}{7,15} = 2,9\ мм^2.$$

По рекомендациям в § 2.4 выбираем провод марки ПЭТСО по два проводника. В соответствии с ГОСТ (приложения 7 и 10), сечение каждого провода $q_я' = 1,431\ мм^2$, сечение двух проводов $q_я = 2,862\ мм^2$. Диаметр голого провода $d_г = 1,35\ мм$, изолированного $d_{из} = 1,57\ мм$.

Уточняем плотность тока:

$$j_я = \frac{i_я}{q_я} = \frac{20,8}{2,862} = 7,26\ a/мм^2.$$

31. Выбираем паз полузакрытый, овальной формы с параллельными сторонами зубца (см. рис. 2.12), рекомендуемый для машин с небольшим диаметром якоря.

32. Площадь поперечного сечения паза, необходимая для размещения изолированных проводов по (2.18), если принять $k_{зп} = 0,66$,

$$S_{пр.п} = \frac{\pi d_{из}^2 N_п}{4k_{зп}} = \frac{\pi \cdot 1,57^2 \cdot 2 \cdot 16}{4 \cdot 0,66} = 94\ мм^2.$$

Материал и количество изоляции и прокладок определяем по табл. 2.4 для изоляции класса В (см. рис. 2.14, *б*).

33. Площадь, занимаемая пазовой изоляцией, по (2.19)

$$S_{пи} = b_{пи} П = 0,58 \cdot 113 = 65,5\ мм^2,$$

где $b_{пи}$ — толщина пазовой изоляции по ширине паза на одну сторону, из табл. 2.4

$$b_{пи} = 0,4 + 0,18 = 0,58\ мм;$$

П — периметр паза по (2.20)

$$\Pi \cong 0{,}7 \cdot D_я \cdot 10 = 0{,}7 \cdot 16{,}2 \cdot 10 = 113\ мм.$$

34. Площадь, занимаемая клином,

$$S_{кл} \approx 2 \cdot 7 = 14\ мм^2.$$

35. Площадь, занимаемая пазовыми прокладками,

$$S_{пп} = (0{,}4 + 0{,}5)\,5 \cong 4{,}5\ мм^2.$$

36. Общая потребная площадь паза по (2.21)

$$S_п = S_{пр.п} + S_{пи} + S_к + S_{пп} = 94 + 65{,}5 + 14 + 4{,}5 \cong 178\ мм^2.$$

37. Размеры шлица по (2.22)

$$b_ш = 4\ мм; \quad h_ш = 0{,}8\ мм.$$

38. Зубцовое деление по внешней поверхности якоря по (2.28)

$$t_1 = \frac{\pi D_я}{Z} = \frac{\pi \cdot 16{,}2}{31} = 1{,}64\ см.$$

39. Ширина зубца в среднем сечении по (2.27)

$$b_{Z_2} = \frac{B_\delta t_1}{B_{Z_2} K_{ст}} = \frac{0{,}715 \cdot 1{,}64}{1{,}86 \cdot 0{,}93} = 0{,}676\ см.$$

В соответствии с табл. 2.6 и рекомендациями в § 2.5 выбираем $B_{Z_2} = 1{,}86$ *тл*.

По табл. 2.5 $K_{ст} = 0{,}93$.

Так как выбрали паз с параллельными сторонами зубца,

$$b_{Z_1} = b_{Z_2} = b_{Z_3} = 0{,}676\ см.$$

40. Размеры паза r_1; r_2; h_1 и $h_п$ (см. рис. 2.12) по (2.23); (2.24); (2.25); (2.26):

$$r_1 = \frac{\pi\,(D_я - 2h_ш \cdot 10^{-1}) - Z b_{Z_2}}{2\,(Z + \pi)} =$$

$$= \frac{\pi\,(16{,}2 - 2 \cdot 0{,}08) - 31 \cdot 0{,}676}{2\,(31 + \pi)} = 0{,}432\ см;$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{r_1^2\,(Z + 5) - \pi S_п \cdot 10^{-2}}{Z - 5}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0{,}432^2\,(31 + 5) - \pi \cdot 178 \cdot 10^{-2}}{31 - 5}} = 0{,}235\ см;$$

$$h_1 = \frac{r_1 - r_2}{\pi}\,Z = \frac{0{,}432 - 0{,}235}{\pi}\,31 = 1{,}96\ см;$$

$$h_п = h_1 + r_1 + r_2 + h_ш 10^{-1} = 1{,}96 + 0{,}432 + 0{,}235 + 0{,}08 = 2{,}7\ см;$$

41. Зубцовый шаг в расчетном сечении по (2.43)

$$t_2 = \frac{\pi\left[D_я - 2\left(h_ш \cdot 10^{-1} + r_1 + \frac{h_1}{2}\right)\right]}{Z} =$$

$$= \frac{\pi\left[16{,}2 - 2\left(0{,}8 \cdot 10^{-1} + 0{,}432 + \frac{1{,}96}{2}\right)\right]}{31} = 1{,}343\ см.$$

42. Ширина зубца в расчетном сечении по (2.44)

$$b_{Z_2} = t_2 - (r_1 + r_2) = 1{,}343 - (0{,}432 + 0{,}235) = 0{,}676\ см.$$

Эта величина равна рассчитанной в п. 39.

43. Длина лобовой части обмотки по (2.52а)

$$l_{лоб.я} = (1{,}0 \div 1{,}2)\tau = 1{,}14 \cdot 12{,}72 = 14{,}5\ см.$$

44. Средняя длина полувитка обмотки якоря по (2.51)

$$l_{ср.я} = l_я + l_{лоб.я} = 14{,}0 + 14{,}5 = 28{,}5\ см.$$

45. Полная длина проводников обмотки якоря по (2.50)

$$L_{мя} = N_я l_{ср.я} = 496 \cdot 28{,}5 = 14136\ см.$$

Полученное значение относится к длине одного проводника. Обмотка содержит два проводника, поэтому фактическая длина провода обмотки

$$L'_{мя} = 14\,136 \cdot 2 = 28\,272\ см.$$

46. Сопротивление обмотки якоря в холодном состоянии при $t = 20°$ С по (2.49)

$$R_я = \frac{L_{мя}}{5700 q_я (2a)^2} = \frac{14\,136}{5700 \cdot 2 \cdot 1{,}431 \cdot 4} = 0{,}216\ ом.$$

47. Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии, при $t = 75°$ С по (2.53)

$$R_{яч} = mR_я = 1{,}22 \cdot 0{,}216 = 0{,}263\ см,$$

где $m = 1{,}22$ по табл. 2.11 для $\Theta = 55°$ С.

48. Вес обмотки якоря по (2.54)

$$G_{мя} = 87 L_{мя} q_я \cdot 10^{-5} = 87 \cdot 14136 \cdot 1{,}431 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 35{,}2\ н.$$

Расчет магнитопровода

Поперечный разрез магнитопровода см. на рис. 3.1, *а*.

Выбираем для якоря сталь Э12 толщиной $\Delta_я = 0{,}5$ *мм*, $K_{ст} = 0{,}93$.

49. Высота зубца по (3.1)

$$h_Z = h_п = 2{,}7\ см.$$

50. Ширина зубца в расчетном сечении по (2.44) и п. 42 расчета

$$b_{Z_2} = 0{,}676\ см.$$

51. Расчетное сечение зубца по (3.2)

$$S_{Z_2} = b_{Z_2} l K_{ст} = 0{,}676 \cdot 14 \cdot 0{,}93 = 8{,}6\ см^2.$$

$l = l_я$, так как нет радиальных каналов.

52. Внутренний диаметр якоря по (3.9), так как $D_я < 50$ *см*, $d_я = d_в$,

$$d_я = K_в \sqrt[3]{\frac{P_{2н}}{n_н}} = 31 \sqrt[3]{\frac{8{,}0}{1500}} = 5{,}34\ см,$$

где в соответствии с табл. 3.1 $K_в = 31$.

Принимаем $d_я = 5{,}5$ *см*.

53. Высота спинки якоря по (3.8)

$$h_я = \frac{D_я - (2h_п + d_я)}{2} = \frac{16{,}2 - (2 \cdot 2{,}7 + 5{,}5)}{2} = 2{,}65\ см.$$

54. Сечение спинки якоря по (3.11а)

$$S_я = h_я l K_{ст} = 2{,}65 \cdot 14 \cdot 0{,}93 = 34{,}5\ см^2.$$

$l = l_я$, так как нет радиальных каналов.

55. Проверяем высоту спинки якоря $h_я$ по допустимой величине индукции $B_я$ в спинке по (3.12)

$$B_я = \frac{\Phi_я}{2S_я} \cdot 10^4 = \frac{81{,}4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 34{,}5} \cdot 10^4 = 1{,}18\ тл,$$

где $\Phi_я$ — поток в якоре по (3.13);

$$\Phi_я = \alpha_i \tau l_i B_\delta \cdot 10^{-4} = 0{,}64 \cdot 12{,}72 \cdot 14 \cdot 0{,}715 \cdot 10^{-4} = 81{,}4 \cdot 10^{-4}\ вб.$$

Значение $B_я$ соответствует допустимому значению для

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50\ гц,$$

по табл. 3.2, где $B_я = 1{,}10$—$1{,}25$ *тл*.

Воздушный зазор между главным полюсом и якорем

56. По кривым рис. 3.3 выбираем зазор $\delta = 0{,}12$ *см*.

Проверяем δ по условию (3.19):

$$\delta \geqslant (0{,}5 \div 0{,}7) \frac{A b_{гн}}{B_\delta} \cdot 10^{-4};$$

$$\delta = (0{,}5 \div 0{,}7) \frac{202{,}8 \cdot 7{,}9}{0{,}715} \cdot 10^{-4} = 0{,}11 \div 0{,}16\ см;$$

$\delta = 0{,}12$ *см* соответствует условию (3.19).

6*

Выбираем для главного полюса листовую холоднокатаную сталь Э330 толщиной $\Delta_г = 0{,}5$ *мм*, $K_{ст} = 0{,}96$.

57. Сечение сердечника главного полюса по (3.25)

$$S_г = \frac{\sigma\Phi_я}{B_г} \cdot 10^4 = \frac{1{,}15 \cdot 81{,}4 \cdot 10^{-4}}{1{,}59} \cdot 10^4 = 59 \ см^2,$$

где $\sigma = 1{,}15$ по рекомендациям к (3.25).

Принимаем $B_г = 1{,}59$ по табл. 3.5 для стали Э330.

58. Длина сердечника главного полюса в соответствии с (3.26)

$$l_г = l_я = 14{,}0 \ см.$$

59. Ширина сердечника главного полюса по (3.27)

$$b_г = \frac{S_г}{l_г K_{ст}} = \frac{59}{14 \cdot 0{,}96} = 4{,}4 \ см.$$

60. Высота сердечника $h_г$ и наконечника $h_{гн}$ главного полюса. По рис. 3.4 $h_г = 5—6$ *см*.

Принимаем общую высоту полюса $h_г + h_{гн} = 6{,}78$ *см*.

61. Ширина полюсного наконечника по (3.29)

$$b_{гн} = b_{i\,гн} - 2\delta = 8{,}14 - 2 \cdot 0{,}12 = 7{,}9 \ см.$$

62. Длина полюсного наконечника по (3.30)

$$l_{гн} = l_г = 14{,}0 \ см.$$

63. Ширина выступа полюсного наконечника (см. § 3.1, п. е)

$$b_{гв} = 0{,}2 b_г = 0{,}2 \cdot 4{,}4 = 0{,}88 \ см.$$

64. Зазор в стыке между главным полюсом и станиной по (3.32)

$$\delta_{гс} \approx 2 l_г \cdot 10^{-4} + 0{,}01 \ см = 2{,}14 \cdot 10^{-4} + 0{,}01.$$

Принимаем $\delta_{гс} = 0{,}01$ *см*.

65. Индукция в зазоре стыка

$$B_{ст} = B_г = 1{,}59 \ тл.$$

Станина

66. Выбираем для станины сталь 3 (сварная). Сечение станины по (3.33)

$$S_с = \frac{\sigma\Phi_я}{2B_с} \cdot 10^4 = \frac{1{,}15 \cdot 81{,}4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1{,}25} \cdot 10^4 = 37{,}5 \ см^2,$$

где $B_с = 1{,}25$ *тл* по рекомендациям к (3.33)

67. Длина станины по (3.34)

$$l_с = l_г + (0{,}5 \div 0{,}7)\tau = 14 + 0{,}6 \cdot 12{,}72 = 21{,}5 \ см.$$

68. Высота станины по (3.35)

$$h_c = \frac{S_c}{l_c} = \frac{37,5}{21,5} = 1,75 \text{ см}.$$

69. Внутренний диаметр станины по (3.36)

$$d_c = D_я + 2(h_г + h_{гн}) + 2\delta = 16,2 + 2 \cdot 6,78 + 2 \cdot 0,12 = 30,0 \text{ см}.$$

70. Внешний диаметр станины по (3.37)

$$D_c = d_c + 2h_c = 30,0 + 2 \cdot 1,75 = 33,5 \text{ см}.$$

Расчет магнитной цепи (см. § 3.2)

71. Э. д. с. при нагрузке по (3.39)

$$E_н = U_н - \Delta U_н,$$

где $\Delta U_н$ — падение напряжения в цепи якоря при номинальной нагрузке,

$$\Delta U_н = I_я (R_{ян} + R_{дн} + R_{сн}) + \Delta U_щ.$$

Так как $R_{дн}$ и $R_{сн}$ неизвестны, определяем э. д. с. предварительно по (3.41а):

$$E_н = U_н\left(0,5 + \frac{\eta}{200}\right) = 220\left(0,5 + \frac{84,5}{200}\right) = 203,3 \text{ в}.$$

После расчета обмоток уточненное значение э. д. с. $E_н = 201,9$ *в*.

72. Магнитный поток в якоре по (3.38)

$$\Phi_я = \frac{60aE_н}{npN_я} = \frac{60a \cdot 201,9}{1500 \cdot 2 \cdot 496} = 81,4 \cdot 10^{-4} \text{ вб}.$$

Далее см. табл. 3.7.

73. Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi_я \cdot 10^4}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{81,4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4}{0,64 \cdot 12,72 \cdot 14} = 0,715 \text{ тл}.$$

74. М. д. с. воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 K_\delta \delta B_\delta \cdot 10^4 = 0,8 \cdot 1,163 \cdot 0,12 \cdot 0,715 \cdot 10^4 = 798 \text{ а},$$

где K_δ — коэффициент воздушного зазора по (3.49),

$$K_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - b_ш + 10\delta} = \frac{1,64 + 10 \cdot 0,12}{1,64 - 0,4 + 10 \cdot 0,12} = 1,163.$$

75. Индукция в зубце

$$B_{Z_2} = K_{Z_2} B_\delta = 2,6 \cdot 0,715 = 1,86 \text{ тл},$$

где K_{Z_2} по (3.48),

$$K_{Z_2} = \frac{t_1}{b_{Z_1}} \cdot \frac{l_я}{l K_{ст}} = \frac{1,64}{0,676} \cdot \frac{14}{14 \cdot 0,93} = 2,6.$$

76. Напряженность магнитного поля в зубце якоря из стали Э12. Так как индукция в зубце $B_{Z_2}=1{,}86$ *тл*$>1{,}8$ *тл*, определяем коэффициент вытеснения потока по (3.46)

$$c_{Z_2}=\frac{t_2}{b_{Z_2}}\cdot\frac{l_я}{lK_{ст}}=\frac{1{,}343}{0{,}676}\cdot\frac{14}{14\cdot 0{,}93}=2{,}13,$$

напряженность — по кривым в приложении 13а:

$$H_{Z_2}=140\ а/см.$$

77. М. д. с. зубца

$$F_Z=L_Z H_{Z_2}=2{,}29\cdot 140=320\ а,$$

где

$$L_Z=h_1+\frac{1}{2}(r_1+r_2)=1{,}96+\frac{1}{2}(0{,}432+0{,}235)=2{,}29\ см.$$

78. Индукция в спинке якоря

$$B_я=\frac{\Phi_я\cdot 10^4}{2h_я\cdot lK_{ст}}=\frac{81{,}4\cdot 10^{-4}\cdot 10^4}{2\cdot 2{,}63\cdot 14\cdot 0{,}93}=1{,}18\ тл.$$

79. Напряженность магнитного поля в спинке якоря по приложению 12

$$H_я=5{,}84\ а/см.$$

80. М. д. с. спинки якоря

$$F_я=L_я H_я=4{,}53\cdot 5{,}84=26{,}6\ а,$$

где

$$L_я=\frac{\pi(d_я+h_я)}{4p}+\frac{h_я}{2}=\frac{\pi(5{,}5+2{,}65)}{8}+\frac{2{,}65}{2}=4{,}53\ см.$$

81. Магнитный поток в главном полюсе

$$\Phi_г=\sigma\Phi_я=1{,}15\cdot 81{,}4\cdot 10^{-4}=93{,}61\cdot 10^{-4}\ вб,$$

где $\sigma=1{,}15$ *см* (3.25).

82. Индукция в сердечнике главного полюса

$$B_г=\frac{\Phi_г\cdot 10^4}{b_г l_г K_{ст}}=\frac{93{,}61\cdot 10^{-4}\cdot 10^4}{4{,}4\cdot 14\cdot 0{,}96}=1{,}58\ тл.$$

83. Напряженность в сердечнике главного полюса по приложению 12

$$H_г=7{,}48\ а/см.$$

84. М. д. с. сердечника главного полюса

$$F_г=L_г H_г=6{,}78\cdot 7{,}48=50{,}7\ а,$$

где $L_г=6{,}78$ *см* по (3.44) и п. 60 расчета.

85. М. д. с. стыка между главным полюсом и станиной

$$F_{\text{ст}}=0{,}8\delta_{\text{ст}}B_{\text{г}}\cdot 10^4=0{,}8\cdot 0{,}01\cdot 1{,}58\cdot 10^4=126{,}4\ a.$$

86. Индукция в станине

$$B_{\text{c}}=\frac{\Phi_{\text{г}}\cdot 10^4}{2h_{\text{c}}l_{\text{c}}}=\frac{93{,}61\cdot 10^{-4}\cdot 10^4}{2\cdot 1{,}75\cdot 21{,}5}=1{,}24\ тл.$$

87. Напряженность магнитного поля в станине по приложению 12

$$H_{\text{c}}=14\ a/см.$$

88. М. д. с. станины

$$F_{\text{c}}=L_{\text{c}}H_{\text{c}}=13{,}34\cdot 14=186{,}8\ a,$$

где L_{c} по (3.45),

$$L_{\text{c}}=\frac{\pi(d_{\text{c}}+h_{\text{c}})}{4p}+\frac{h_{\text{c}}}{2}=\frac{\pi(30+1{,}75)}{4\cdot 2}+\frac{1{,}75}{2}=13{,}34\ см.$$

89. Суммарная м. д. с.

$$F_{\Sigma}=F_{\delta}+F_{Z}+F_{\text{я}}+F_{\text{г}}+F_{\text{ст}}+F_{\text{c}}=$$
$$=798+320+26{,}6+50{,}7+126{,}4+186{,}8=1509\ a.$$

90. М. д. с. переходного слоя

$$F_{\delta+Z}=F_{\delta}+F_{Z}=793+320=1118\ a.$$

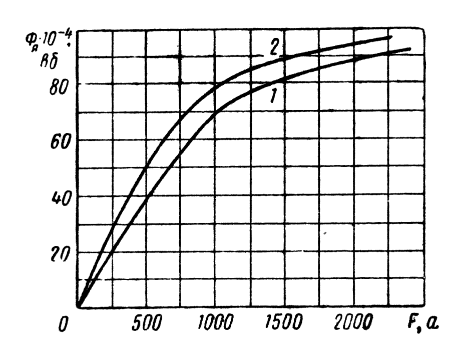


Рис. Р.1. Характеристики намагничивания (1) и переходная (2)

Далее аналогичным образом рассчитывается магнитная цепь для потоков, равных 0,5; 0,8; 1,1 и 1,15 от номинального значения и строятся характеристики намагничивания и переходная (см. рис. Р.1).

Результаты расчетов магнитной цепи приведены в табл. Р.1.

Таблица P.1

	$E=0,5E_н$	$E=0,85E_н$	$E=E_н$	$E=1,1E_н$	$E=1,15E_н$
$\Phi_я=\frac{60aE}{npN_я}$, *вб*	$40,7\cdot10^{-4}$	$69,2\cdot10^{-4}$	$81,4\cdot10^{-4}$	$89,5\cdot10^{-4}$	$93,6\cdot10^{-4}$
$B_\delta=\frac{\Phi_я}{a_i\tau l_i}\cdot10^4$, *тл*	0,358	0,608	0,715	0,787	0,822
$F_\delta=0,8K_\delta\delta B_\delta\cdot10^4$, *а*	399	678	798	878	918
$B_{Z_2}=K_{Z_2}B_\delta$, *тл*	0,930	1,580	1,860	2,046	2,137
H_{Z_2}, *а/см*	3,21	29,4	140	310	420
$F_{Z_2}=L_Z H_{Z_2}$, *а*	7,35	67,33	320	710	961,8
$B_я=\frac{\Phi_я}{2h_я l_я K_{ст}}\cdot10^4$, *тл*	0,59	1,003	1,18	1,3	1,357
$H_я$, *а/см*	1,68	3,7	5,84	8,2	10,45
$F_я=L_я H_я$, *а*	7,44	16,4	26,6	36,3	46,3

Продолжение Р.1

	$E=0{,}5E_н$	$E=0{,}85E_н$	$E=E_н$	$E=1{,}1E_н$	$E=1{,}15E_н$
$\Phi_г=\sigma\Phi_я$, *вб*	$46{,}8\cdot10^{-4}$	$79{,}58\cdot10^{-4}$	$93{,}6\cdot10^{-4}$	$102{,}93\cdot10^{-4}$	$107{,}64\cdot10^{-4}$
$B_г=\frac{\Phi_г}{b_г l_г K_{ст}}\cdot10^4$, *тл*	0,79	1,34	1,58	1,74	1,82
$H_г$, *а/см*	1,5	4,0	7,48	14	22
$F_г=L_г H_г$, *а*	10,0	27,12	50,71	94,9	149,2
$F_{ст}=0{,}8\delta_{ст}B_г\cdot10^4$, *а*	63	107	126,4	139	145
$B_с=\frac{\Phi_г}{2h_с l_с}$, *тл*	0,62	1,054	1,24	1,36	1,426
$H_с$, *а/см*	5,06	10	14	18,8	22,6
$F_с=L_с H_с$, *а*	67,5	133,4	186,8	250,8	301,5
$F_\Sigma=\sum F$, *а*	554,29	1029,25	1509	2108,5	2522,4
$F_{\delta+Z}=F_\delta+F_Z$, *а*	406,4	745,3	1118	1588	1879,8

91. Определяем м. д. с. поперечной реакции якоря.

В соответствии с § 3.4 на переходной характеристике (см. рис. Р.2) от точки a, соответствующей номинальному значению индукции в воздушном зазоре $B_\delta = 0{,}715$ *тл*, откладываем отрезки, равные

$$0{,}5Ab_{i\,\text{гн}} = 0{,}5 \cdot 202{,}8 \cdot 8{,}13 = 824\ a.$$

Выравнивая площади криволинейных треугольников S_{acd} и S_{afg} определяем $F_{\text{яр}} = 200\ a$.

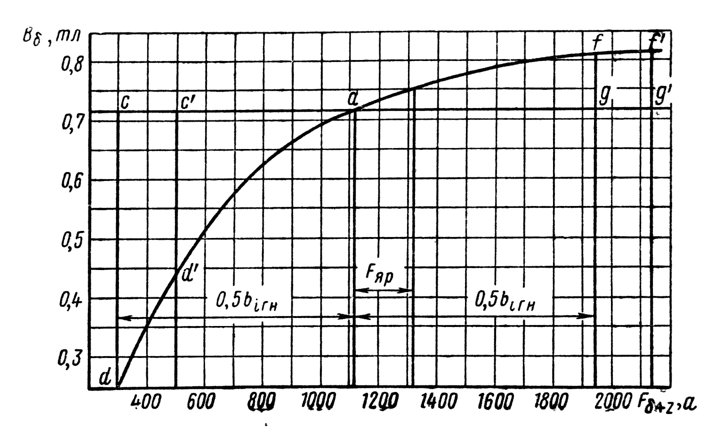


Рис. Р.2. Определение м. д. с. поперечной реакции якоря

Расчет параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения

92. М. д. с. параллельной обмотки по (3.68)

$$F_{\text{ш}} = F_{\Sigma} + F_{\text{яр}} - F_{\text{с}} = 1509 + 200 - 333 = 1376\ a,$$

где $F_{\text{с}}$ — м. д. с. последовательной (сериесной) обмотки по (3.70а)

$$F_{\text{с}} = 0{,}2F_{\Sigma} = 0{,}2 \cdot 1509 = 302\ a.$$

Уточняем $F_{\text{с}}$ с учетом числа витков:

$$w_{\text{с}} = \frac{F_{\text{с}}}{I_{\text{я}}}\, a_{\text{с}} = \frac{302}{41{,}6} \cdot 1 = 7{,}25,$$

где $I_{\text{я}}$ — ток в якоре

$$I_{\text{я}} = I_1 - I_{\text{ш}} = 43{,}2 - 1{,}6 = 41{,}6\ a.$$

Принимаем $w_{\text{с}} = 8$.

Уточненное значение

$$F_{\text{с}} = w_{\text{с}} I_{\text{я}} = 8 \cdot 41{,}6 = 333\ a.$$

93. Сечение меди параллельной обмотки по (3.71)

$$q_ш = \frac{k_{зап} m 2p F_ш l_{ср ш}}{5700 U_ш a_ш} = \frac{1,05 \cdot 1,22 \cdot 4 \cdot 1376 \cdot 55,8}{5\,700 \cdot 220 \cdot 1} = 0,302 \text{ мм}^2.$$

Здесь по (3.72)

$$l_{ср.ш} = 2(b_г + l_г) + \pi(b_к + 2r_к) =$$
$$= 2(4,4 + 14,0) + \pi(4,6 + 2 \cdot 0,7) = 55,8 \text{ см},$$

где $b_к = 4,6$ *см* и $r_к = 0,7$ *см* приняты предварительно в соответствии с рекомендациями к (3.72); $k_{зап} = 1,05$; $U_ш = U_н$.

По рекомендациям в § 3.6 выбираем провод марки ПЭТСО, по приложениям 7 и 10 $q_ш = 0,302$ *мм²*; диаметр голого провода $d_г = 0,62$ *мм*, изолированного — $d_{из} = 0,82$ *мм*.

94. Номинальный ток возбуждения по (3.73)

$$I_ш = q_ш j_ш = 0,302 \cdot 5,25 = 1,6 \text{ а},$$

где $j_ш = 5,25$ *а/мм²* при самовентиляции по рекомендациям к (3.73).

95. Число витков на полюс по (3.74)

$$w_ш = \frac{F_ш}{I_ш} = \frac{1376}{1,6} = 860.$$

96. Сечение катушки полюса по (3.75)

$$S_к = \frac{w_ш q_ш}{k_{зв}} = \frac{860 \cdot 0,302}{0,5} = 51,9 \text{ мм}^2.$$

97. Полная длина обмотки по (3.76)

$$L_ш = 2p l_{ср.ш} w_ш = 4 \cdot 55,8 \cdot 860 = 19,2 \cdot 10^4 \text{ см}.$$

98. Сопротивление обмотки в холодном состоянии, при $t = 20°$ C по (3.77)

$$R_ш = \frac{L_ш}{5700 q_ш a_ш^2} = \frac{19,2 \cdot 10^4}{5700 \cdot 0,302 \cdot 1} = 112,7 \text{ ом},$$

где приняли $a_ш = 1$.

99. Сопротивление обмотки в нагретом состоянии при $t = 75°$ C по (3.78)

$$R_{шн} = m R_ш = 1,22 \cdot 112,7 = 137,5 \text{ ом}.$$

100. Вес меди параллельной обмотки по (3.79)

$$G_{мш} = 87 L_ш q_ш \cdot 10^{-5} = 87 \cdot 19,2 \cdot 10^4 \cdot 0,302 \cdot 10^{-5} = 50,46 \text{ н}.$$

Расчет последовательной (сериесной) обмотки

101. М. д. с. последовательной (сериесной) обмотки F_c и число витков w_c:

$$F_c = 333\ a \text{ (см. п. 92)};$$

$$w_c = 8 \text{ (см. п. 92)}.$$

102. Сечение меди провода по (3.82)

$$q_c = \frac{I_я}{a_c j_c} = \frac{41{,}6}{1 \cdot 3{,}25} = 12{,}8\ мм^2,$$

где в соответствии с замечанием к (3.82) приняли $j_c = 3{,}25\ а/мм^2$.

По рекомендациям в § 3.6 выбираем прямоугольный провод марки ПСД по приложениям 9 и 10:

$q_c = 12{,}8\ мм^2$, размеры голого провода $2{,}83 \cdot 4{,}7\ мм^2$, изолированного $3{,}13 \cdot 5{,}07\ мм^2$.

Проверяем размещение катушек в междуполюсном пространстве и устанавливаем, что в нижней части полюса размещается параллельная катушка, в верхней — последовательная.

103. Средняя длина витка обмотки по (3.72)

$$l_{ср.с} = 2(b_г + l_г) + \pi(b_к + 2r_к) =$$

$$= 2(4{,}4 + 14{,}0) + \pi(3{,}0 + 2 \cdot 0{,}4) = 48{,}8\ см,$$

где $b_к = 3{,}0\ см$ и $r_к = 0{,}4\ см$ приняли предварительно в соответствии с рекомендациями к (3.72).

104. Полная длина обмотки по (3.83)

$$L_c = 2pl_{ср.с}w_c = 4 \cdot 8 \cdot 48{,}8 = 1562\ см.$$

105. Сопротивление последовательной обмотки в холодном состоянии, при $t = 20°$ С по (3.84)

$$R_c = \frac{L_c}{5700 q_c a_c^2} = \frac{1562}{5700 \cdot 12{,}8 \cdot 1} = 0{,}0214\ ом.$$

106. Сопротивление последовательной обмотки в нагретом состоянии, при $t = 75°$ С по (3.85)

$$R_{сн} = mR_c = 1{,}22 \cdot 0{,}0214 = 0{,}026\ ом.$$

107. Общий вес меди последовательной обмотки по (3.86)

$$G_{мс} = 87 L_c q_c 10^{-5} = 87 \cdot 15\,620 \cdot 12 \cdot 10^{-5} = 17{,}4\ н.$$

Расчет коллектора

108. Диаметр рабочей поверхности коллектора по (4.1)

$$D_к = \frac{\tau_к}{\pi} K = \frac{0,423}{\pi} 93 = 12,5 \text{ см},$$

где $\tau_к = 0,423$ *см* выбираем по рекомендациям в § 4.1.

Число коллекторных пластин по § 2.2, п. 5.

$K = 93$.

Проверяем величину $D_к$ по рекомендациям. Из практики $\frac{D_к}{D_я} = 0,5 - 0,8$. В настоящем расчете

$$\frac{D_к}{D_я} = \frac{12,5}{16,2} = 0,77.$$

Проверяем приемлемость $D_к$ по допустимой окружной скорости вращения коллектора:

$$v_к = \frac{\pi D_к}{60} n_н 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 12,5}{60} = 1500 \cdot 10^{-2} = 9,81 \text{ м/сек},$$

что допустимо по рекомендациям к (4.2).

109. Ширина коллекторной пластинки по (4.3)

$$b_{кп} = \tau_к - \Delta_к = 0,423 - 0,05 = 0,373 \text{ см},$$

где принято $\Delta_к = 0,05$ *см*.

110. Толщина заплечика пластины (см. рис. 4.2) $b_к' = 0,04$ *см*.

Выбор щеток и щеткодержателей

111. Исходя из рекомендации в § 4.2, выбираем щетки электрографитированные ЭГ71 и радиальный щеткодержатель.

112. Ширина щетки предварительно по (4.4)

$$b_щ = (1 \div 3)\tau_к = 2,4 \cdot 0,423 = 1,01 \text{ см}.$$

В соответствии с ГОСТом (см. приложение 16) $b_щ = 1,0$ *см*, длина щетки $l_щ = 1,25$ *см*.

113. Ширина соприкосновения щетки с коллектором по (4.5а) $b_щ' = b_щ = 1,0$ *см* (для радиального щеткодержателя).

114. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором по (4.6а)

$$S_щ = b_щ' l_щ = 1,0 \cdot 1,25 = 1,25 \text{ см}^2.$$

115. Число щеток на один щеточный болт по (4.7)

$$N_{щб} = \frac{I_я}{p_{щб} S_щ j_щ} = \frac{41,6}{2 \cdot 1,25 \cdot 8,3} = 2,$$

где $p_{щб}=2$ — число пар щеточных болтов по рекомендациям в § 4.2;

$j_{щ}=8{,}3$ $а/см$ — плотность тока под щеткой.

116. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором по (4.6б)

$$\sum S_{щ}=2p_{щб}N_{щб}S_{щ}=2\cdot 2\cdot 2\cdot 1{,}25=10{,}0\ см^2.$$

117. Активная длина коллектора по 4.8б

$$l'_{к}=N_{щб}(l_{щ}+0{,}8)+1{,}0=2(1{,}25+0{,}8)+1{,}0=5{,}1\ см.$$

Проверка коммутации

118. Реактивная э. д. с. коммутируемой секции по (4.9)

$$e_{р}=2w_{ся}l_{i}Av_{я}\xi 10^{-2}=$$

$$=2\cdot\frac{8}{3}\cdot 14\cdot 202{,}8\cdot 12{,}7\cdot 5{,}952\cdot 10^{-4}\cdot 10^{-2}=1{,}145\ в,$$

где по (4.10б)

$$\xi=\left(0{,}6\frac{h_{п}}{2r_2}+\frac{h_{ш}}{b_{ш}}+\frac{l_{лоб.я}}{l}\right)\cdot 10^{-4}+$$

$$+\frac{0{,}25\cdot 10^2}{\frac{p}{a}w_{ся}l_{i}Av_{я}}=\left(0{,}6\frac{2{,}7}{2\cdot 0{,}235}+\frac{0{,}08}{0{,}4}+\frac{14}{4}\right)\cdot 10^{-4}+$$

$$+\frac{0{,}25\cdot 10^2}{2\cdot\frac{8}{3}\cdot 14\cdot 202{,}8\cdot 12{,}7}=5{,}952\cdot 10^{-4}.$$

119. Э. д. с. от поперечного поля реакции якоря по (4.11а)

$$e_{яр}=2w_{ся}l_{i}B_{яр}v_{я}\cdot 10^{-2}=2\cdot\frac{8}{3}\cdot 14\cdot 0{,}07\cdot 12{,}7\cdot 10^{-2}=0{,}664\ в,$$

где по (4.12)

$$B_{яр}=1{,}25\cdot 10^{-4}\frac{A}{1-\alpha_{i}}=1{,}25\cdot 10^{-4}\frac{202{,}8}{1-0{,}64}=0{,}07\ тл,$$

$$e_{р}+e_{яр}=1{,}145+0{,}664=1{,}809\ в.$$

Коммутацию можно считать удовлетворительной. Однако, исходя из общих рекомендаций (см. § 4.3), выполняем машину с добавочными полюсами.

120. Ширина зоны коммутации по (4.13)

$$b_{зк}=b_{щ}\frac{D_{я}}{D_{к}}+\left(u_{п}-\frac{a}{p}+\varepsilon\right)\tau'_{к}=1\cdot\frac{16{,}2}{12{,}5}+$$

$$+\left(3-\frac{1}{2}+0{,}75\right)\cdot 0{,}55=3{,}1\ см,$$

где

$$\tau'_{к}=\tau_{к}\frac{D_{я}}{D_{к}}=0{,}423\cdot\frac{16{,}2}{12{,}5}=0{,}55\ см.$$

Проверяем приемлемость $b_{зк}$ по (4.15в):

$$\frac{b_{зк}}{\tau - b_{гн}} = \frac{3,1}{12,72 - 7,9} = 0,65,$$

т. е. соответствует рекомендуемой величине.

Расчет добавочного полюса

Выбираем для добавочного полюса сталь Э11 толщиной $\Delta_д = 1$ *мм*, $K_{ст} = 0,96$.

121. Ширина дуги наконечника добавочного полюса по (4.16а)

$$b_{дн} = 0,85 \cdot b_{зк} = 0,85 \cdot 3,1 = 2,64 \text{ см}.$$

122. Расчетная ширина дуги наконечника по (4.16б)

$$b_{i\,дн} = b_{дн} + 3\delta_д = 2,64 + 3 \cdot 0,17 = 3,15 \text{ см},$$

где по (4.17) принимаем

$$\delta_д = 1,4\delta = 1,4 \cdot 0,12 \cong 0,17 \text{ см}.$$

123. Длина сердечника добавочного полюса по (4.18б)

$$l_д = l_я - 2,0 = 14,0 - 2,0 = 12 \text{ см}.$$

124. Длина наконечника по (4.19а)

$$l_{дн} = l_я = 14,0 \text{ см}.$$

125. Расчетная длина наконечника по (4.19б)

$$l_{i\,дн} = l_i = 14,0 \text{ см}.$$

126. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом по (4.20а)

$$B_д = \frac{e_р}{2w_{ся} l_{i\,дн} v_я} \cdot 10^2 = \frac{1,145}{2 \cdot \frac{8}{3} \cdot 14 \cdot 12,7} \cdot 10^2 = 0,1207 \text{ тл}.$$

127. Магнитный поток в воздушном зазоре под добавочным полюсом по (4.21)

$$\Phi_д = B_д b_{i\,дн} l_{i\,дн} \cdot 10^{-4} = 0,1207 \cdot 3,15 \cdot 14 \cdot 10^{-4} = 5,32 \cdot 10^{-4} \text{ вб}.$$

128. Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса по (4.22)

$$\Phi_{пд} = \sigma_д \Phi_д = 2,5 \cdot 5,32 \cdot 10^{-4} = 13,3 \cdot 10^{-4} \text{ вб}.$$

129. Сечение сердечника добавочного полюса по (4.23)

$$S_д = b_д l_д K_{ст} = 2,2 \cdot 12,0 \cdot 0,96 = 25,34 \text{ см}^2,$$

где предварительно по рис. 4.6 $b_д = 2,2$ *см*.

Проверка насыщения магнитной цепи добавочных полюсов

130. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса по (4.24)

$$B_{\text{пд}} = \frac{\Phi_{\text{пд}}}{S_{\text{д}}} 10^4 = \frac{13,3 \cdot 10^{-4}}{25,34} \cdot 10^4 = 0,525 \ \text{тл}$$

соответствует рекомендациям, где

$$B_{\text{пд}} \leqslant 1,3 \div 1,4 \ \text{тл}.$$

131. Расчетная индукция в станине на участках, в которых складываются потоки главных и добавочных полюсов, по (4.25)

$$B'_{\text{с}} = \frac{\sigma\Phi_{\text{я}} + \Phi_{\text{пд}}}{2S_{\text{с}}} \cdot 10^4 = \frac{1,15 \cdot 81,4 \cdot 10^{-4} + 13,3 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 37,5} \cdot 10^4 = 1,427 \ \text{тл}$$

соответствует рекомендациям, где

$$B_{\text{с}} \leqslant 1,4 \div 1,5 \ \text{тл}.$$

132. Расчетная индукция в спинке якоря на участках, в которых складываются потоки главных и добавочных полюсов, по (4.26)

$$B'_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\text{я}} + \Phi_{\text{д}}}{2S_{\text{я}}} \cdot 10^4 = \frac{81,4 \cdot 10^{-4} + 5,32 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 34} \cdot 10^4 = 1,276 \ \text{тл}$$

соответствует рекомендациям, где

$$B'_{\text{я}} \leqslant 1,6 \div 1,7 \ \text{тл}.$$

Определение м. д. с. обмотки добавочных полюсов

133. М. д. с. на преодоление реакции якоря на один полюс для некомпенсированной машины по (4.28)

$$F_{\text{яр}} = 0,5A\tau = 0,5 \cdot 202,8 \cdot 12,72 = 1290 \ a.$$

134. М. д. с. воздушного зазора под добавочным полюсом по (4.29)

$$F_{\delta_{\text{д}}} = 0,8\delta_{\text{д}} K_{\delta_{\text{д}}} B_{\text{д}} \cdot 10^4 = 0,8 \cdot 0,17 \cdot 1,136 \cdot 0,1207 \cdot 10^4 = 186,5 \ a,$$

где по (4.30)

$$K_{\delta_{\text{д}}} = \frac{t_1 + 10\delta_{\text{д}}}{t_1 - b_{\text{ш}} + 10\delta_{\text{д}}} = \frac{1,64 + 10 \cdot 0,17}{1,64 - 0,4 + 10 \cdot 0,17} = 1,136.$$

135. Индукция в зубце по (4.31)

$$B_{Z_{\text{д}_2}} = K_{Z_2} B_{\text{д}} = 2,1 \cdot 0,1207 = 0,25 \ \text{тл}.$$

136. Напряженность поля в зубце по приложению *12*

$$H_{Z_{Д2}} = 0{,}8\ а/см.$$

137. М. д. с. зубца под добавочным полюсом по (4.33)

$$F_{Z_{Д2}} = L_Z H_{Z_{Д2}} = 2{,}4 \cdot 0{,}8 = 1{,}92\ а.$$

138. Индукция в сердечнике добавочного полюса по (4.34)

$$B_{пд} = \frac{\Phi_{пд}}{b_д l_д K_{ст}} \cdot 10^4 = \frac{13{,}3 \cdot 10^{-4}}{2{,}2 \cdot 12 \cdot 0{,}96} \cdot 10^4 = 0{,}525\ тл.$$

139. Напряженность поля в сердечнике добавочного полюса по приложению *12*

$$H_{пд} = 1{,}53\ а/см.$$

140. М. д. с. сердечника добавочного полюса по (4.35)

$$F_{пд} = L_д H_{пд} = 6{,}73 \cdot 1{,}53 = 10{,}3\ а,$$

где

$$L_д = h_д = h_г - (\delta_д - \delta) = 6{,}78 - (0{,}17 - 0{,}12) = 6{,}73\ см.$$

141. Индукция в спинке якоря от потока добавочных полюсов по (4.36)

$$B_{яд} = \frac{\Phi_д}{2 h_я l_я K_{ст}} \cdot 10^4 = \frac{5{,}32 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2{,}63 \cdot 14 \cdot 0{,}96}\ 10^4 = 0{,}075\ тл.$$

142. Индукция в спинке якоря от согласного действия потоков главных и добавочных полюсов по (4.37)

$$B'_{яд} = B_я + B_{яд} = 1{,}18 + 0{,}075 = 1{,}255\ тл.$$

143. Индукция в спинке якоря от встречного действия потоков главных и добавочных полюсов по (4.38)

$$B''_{яд} = B_я - B_{яд} = 1{,}18 - 0{,}075 = 1{,}105\ тл.$$

144. Напряженность поля в спинке якоря по приложению *12* в результате согласного действия потоков главных и добавочных полюсов $H'_{яд} = 7{,}25$ и встречного действия $-H''_{яд} = 4{,}86$.

145. М. д. с. спинки якоря по (4.39)

$$F_{яд} = \frac{H'_{яд} - H''_{яд}}{2}\ L_я = \frac{7{,}25 - 4{,}86}{2}\ 4{,}43 = 5{,}32\ а.$$

146. Индукция в станине от потока добавочных полюсов по (4.40)

$$B_{сд} = \frac{\Phi_{пд}}{2 h_с l_с}\ 10^4 = \frac{13{,}3 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1{,}75 \cdot 21{,}5}\ 10^4 = 0{,}1768\ тл.$$

147. Индукция в станине в результате согласного действия потоков главных и добавочных полюсов по (4.41)

$$B'_{сд} = B_с + B_{сд} = 1,24 + 0,1768 = 1,417 \text{ тл}.$$

148. Индукция в станине в результате встречного действия потоков главных и добавочных полюсов по (4.42)

$$B''_{сд} = B_с - B_{сд} = 1,24 - 0,1768 = 1,063 \text{ тл}.$$

149. Напряженность поля в станине по приложению *12* в результате согласного действия потоков главных и добавочных полюсов $H'_{сд} = 22,0$ *а/см*; встречного действия — $H''_{сд} = 10,3$ *а/см*.

150. М. д. с. станины по (4.43)

$$F_{сд} = \frac{H'_{сд} - H''_{сд}}{2} L_с = \frac{22,0 - 10,3}{2} 13,34 = 78,0 \text{ а}.$$

151. М. д. с. стыка между станиной и добавочным полюсом по (4.44)

$$F_{стд} = 20 B_{пд} = 20 \cdot 0,525 = 10,5 \text{ а}.$$

152. Полное падение м. д. с. на один полюс в цепи добавочных полюсов по (4.45)

$$F_{цд} = F_{\delta_д} + F_{z_д} + F_{пд} + F_{яд} + F_{сд} + F_{стд} =$$
$$= 186,5 + 1,92 + 10,3 + 5,32 + 78,0 + 10,5 = 292,5 \text{ а}.$$

153. Полная м. д. с. обмотки добавочных полюсов по (4.27)

$$F_д = F_{цд} + 0,5\tau A = 292,5 + 1290 = 1582,5 \text{ а}.$$

Расчет обмотки добавочных полюсов

154. Число витков на одном добавочном полюсе по (4.64)

$$w_д = \frac{F_д}{I_я} a_д = \frac{1582,5}{41,6} = 38,1,$$

где принято $a_д = 1$. Принимаем $w_д = 38$.

155. Сечение провода обмотки по (4.65)

$$q_д = \frac{I_я}{a_д j_д} = \frac{41,6}{1 \cdot 3,3} = 12,6 \text{ мм}^2,$$

где $j_д = 3,3$ $а/мм^2$ по рекомендации к (4.65).

Соответственно рекомендациям в § 4.5 и для унификации обмоток выбираем прямоугольный провод ПСД, по приложениям 9 и 10 сечение провода $q_д = 12,8$ $мм^2$; размеры голого $2,83 \times 4,7$; изолированного $3,13 \times 5,07$.

Уточняем плотность тока в обмотке по (4.66):

$$j_{д}=\frac{I_{я}}{a_{д}q_{д}}=\frac{41,6}{1\cdot 12,8}=3,5\ а/мм^{2}.$$

156. Средняя длина витка многослойной катушки обмотки добавочного полюса по (4.67)

$$l_{ср.д}=2(b_{д}+l_{д})+\pi(b_{дк}+2r_{к})=$$
$$=2(2,2+12)+\pi(2,1+2\cdot 0,3)=36,87\ см.$$

157. Полная длина обмотки добавочных полюсов по (4.69)

$$L_{д}=2p_{д}l_{ср.д}w_{д}=4\cdot 36,87\cdot 38=5604\ см,$$

где $2p_{д}=2p=4$.

158. Сопротивление обмотки добавочных полюсов в холодном состоянии, при $t=20°$ С по (4.68)

$$R_{д}=\frac{L_{д}}{5700\cdot q_{д}a_{д}^{2}}=\frac{5604}{5700\cdot 12,8\cdot 1}=0,077\ ом.$$

159. Сопротивление обмотки добавочных полюсов в нагретом состоянии, при $t=75°$ С, по (4.70)

$$R_{дн}=mR_{д}=1,22\cdot 0,077=0,094\ ом.$$

160. Вес меди обмотки добавочных полюсов по (4.71)

$$G_{д}=87\cdot L_{д}q_{д}\cdot 10^{-5}=87\cdot 5604\cdot 12,8\cdot 10^{-5}=63,2\ н.$$

161. Уточненное значение э. д. с. по (4.72)

$$E_{н}=U_{н}-\Delta U_{н}=220-18,1=201,9\ в,$$

где по (4.73)

$$\Delta U_{н}=I_{я}(R_{ян}+R_{дн}+R_{сн})+\Delta U_{щ}=$$
$$41,6(0,263+0,094+0,026)+2,2=18,1\ в.$$

Уточненное значение $E_{н}$ не равно приближенному, рассчитанному в п. 71; поэтому был сделан перерасчет, начиная с п. 72.

162. Уточненное значение магнитного потока по (4.74)

$$\Phi_{ян}=\frac{60aE_{н}}{n_{н}pN_{я}}=\frac{60\cdot a\cdot 201,9}{1500\cdot 2\cdot 496}=81,4\cdot 10^{-4}\ вб.$$

Уточненное значение магнитного потока равно приближенному, рассчитанному в п. 71.

Расчет потерь и к. п. д.

163. Электрические потери в обмотке якоря по (5.3)

$$\Delta P_{мя}=I_{я}^{2}R_{ян}=41,6^{2}\cdot 0,263=455,1\ вт.$$

164. Электрические потери в последовательной обмотке по (5.4)

$$\Delta P_{мс} = I_{я}^{2} R_{сн} = 41{,}6^2 \cdot 0{,}026 = 45 \text{ вт}.$$

165. Электрические потери в параллельной обмотке по (5.5)

$$\Delta P_{мш} = I_{ш}^{2} R_{шн} = 1{,}6^2 \cdot 137{,}5 = 352 \text{ вт}.$$

166. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов по (5.7)

$$\Delta P_{мд} = I_{я}^{2} R_{дн} = 41{,}6^2 \cdot 0{,}094 = 162{,}7 \text{ вт}.$$

167. Электрические потери в переходном контакте **щеток на** коллекторе по (5.9)

$$\Delta P_{кщ} = \Delta U_{щ} I_{я} = 2{,}2 \cdot 41{,}6 = 91{,}5 \text{ вт}.$$

168. Магнитные потери в спинке якоря по (5.11)

$$\Delta P_{стя} = 0{,}102 \cdot K_{яс} B_{я}^{2} G_{стя} = 0{,}102 \cdot 9{,}23 \cdot 1{,}18^2 \cdot 67{,}1 = 87{,}93 \text{ вт},$$

где по табл. 5.1

$$K_{яс} = \frac{f^2 + 70f}{650} = \frac{50^2 + 70 \cdot 50}{650} = 9{,}23,$$

$G_{стя}$ — вес спинки якоря по (5.12),

$$G_{стя} = 76 \frac{\pi}{4} (D_Z^2 - d_я^2) l K_{ст} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 76 \frac{\pi}{2} (10{,}8^2 - 5{,}5^2)\, 14 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 67{,}1 \text{ н}.$$

169. Магнитные потери в зубцах якоря по (5.13)

$$\Delta P_{стZ} = 0{,}102 \cdot K_Z B_{Z_2}^{2} G_{стZ} =$$

$$= 0{,}102 \cdot 8{,}9 \cdot 1{,}86^2 \cdot 46{,}06 = 144{,}7 \text{ вт},$$

где по табл. 5.1

$$K_Z = \frac{f^2 + 30f}{450} = \frac{50^2 + 30 \cdot 50}{450} = 8{,}9,$$

$G_{стZ}$ — вес стали зубцов якоря по (5.14а),

$$G_{стZ} = 76 \cdot Z b_{Z_2} \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l K_{ст} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 76 \cdot 31 \cdot 0{,}656 \left(1{,}96 + \frac{0{,}432 + 0{,}235}{2}\right) \cdot 14 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 46{,}06 \text{ н}.$$

170. Механические потери от трения щеток о коллектор по (5.15)

$$\Delta P_{тщ}=K_т \sum S_щ p_щ v_к=0{,}2\cdot 10\cdot 2{,}5\cdot 9{,}81=49{,}0\ вт.$$

171. Механические потери в подшипниках и от трения якоря о воздух по рис. 5.1.

$$\Delta P_{тп}+\Delta P_в=60\ вт.$$

172. Добавочные потери по (5.18)

$$\Delta P_д=0{,}01\cdot P_{2н}=0{,}01\cdot 8000=80\ вт.$$

173. Суммарные потери по (5.2)

$$\sum\Delta P=\Delta P_{мя}+\Delta P_{мс}+\Delta P_{мш}+\Delta P_{мд}+\Delta P_{кщ}+$$
$$+\Delta P_{стя}+\Delta P_{стZ}+\Delta P_{тщ}+\Delta P_{тп}+\Delta P_в+\Delta P_д=$$
$$=455{,}1+45{,}0+352{,}0+162{,}7+91{,}5+87{,}9+144{,}7+49+$$
$$+60+80=1528\ вт.$$

174. Потребляемая из сети мощность по (5.19)

$$P_1=P_{2н}+\sum\Delta P=8000+1528=9528\ вт.$$

175. Коэффициент полезного действия по (5.1)

$$\eta=\frac{P_{2н}}{P_1}\cdot 100=\frac{8000}{9528}\cdot 100=83{,}96\%.$$

176. Потребляемый из сети ток по (5.19)

$$I_1=\frac{P_1}{U_н}=\frac{9528}{220}=43{,}31\ а.$$

Предварительно была принята величина тока $I_1=43{,}2$ *а*; таким образом расхождение весьма незначительное, поэтому перерасчета машины не требуется.

Расчет характеристик

Расчет характеристик произведен в соответствии с § 5.2 и сведен в табл. Р. 2.

Пояснения к расчетам

$$\sum R_{цян}=R_{ян}+R_{сн}+R_{дн}=0{,}263+0{,}026+0{,}094=0{,}383\ ом.$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_к=\frac{U-\Delta U_щ}{\Sigma R_{цян}}=\frac{220-2{,}2}{0{,}383}=307{,}5\ а,$$

где $\Delta U_щ=2{,}2$ *в* (для выбранной щетки ЭГ71 — см. приложение 14).

Таблица Р.2

$I_я$, *а*	20	30	41,6	50	60	70
$I_я \sum R_н = 0,383 I_я$, *в*	7,7	11,5	15,9	19,1	23	26,8
$j_щ = \frac{I_л}{S_ш} = \frac{I_я}{S}$, *а/мм²*	4	6	8,3	10	12	14
$\Delta U_щ$, *в*	1,2	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2
$\Delta U = I_я \sum R_н + \Delta U_щ$, *в*	8,9	13,5	18,1	21,3	25,2	29
$E = U \Delta U = 220 - \Delta U$, *в*	211,1	206,5	201,9	198,7	194,8	191
$F_в = I_я w_с + \frac{U}{R_{шн}} w_ш$, *а*	1536	1616	1709	1776	1856	1936
$\Phi_{я\,наг} = f(E_\Sigma)$ по кривым, *вб*	$78,6 \cdot 10^{-4}$	$80,0 \cdot 10^{-4}$	$81,4 \cdot 10^{-4}$	$82,0 \cdot 10^{-4}$	$81,0 \cdot 10^{-4}$	$80,5 \cdot 10^{-4}$
$n = \frac{60aE}{PN_я \Phi_{я\,наг}} = 0,06 \frac{E}{\Phi_{я\,наг}}$, *об/мин*	1610	1550	1489	1453	1442	1422
$f = \frac{P_п}{60} = \frac{n}{60}$, *гц*	53,7	51,7	49,9	48,4	48	47,4

$K_{яс}$	10,22	9,68	9,23	8,79	8,72	8,51
K_Z	9,99	9,38	8,9	8,4	8,32	8,14
$B_я = \frac{\Phi_{я\,наг} \cdot 10^4}{2 n_я l_я K_{ст}} = \frac{\Phi_{я\,наг} \cdot 10^4}{69}$, *тл*	1,14	1,16	1,18	1,19	1,175	1,167
$B_\delta = \frac{\Phi_{я\,наг} \cdot 10^4}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{\Phi_{я\,наг} \cdot 10^4}{113{,}8}$, *тл*	0,69	0,70	0,715	0,721	0,712	0,707
$B_{Z_2} = K_{Z_2} B_\delta = 2{,}6 B_\delta$, *тл*	1,79	1,82	1,86	1,875	1,851	1,838
$\Delta P_{ст\,я} = 0{,}102 K_{яс}$, $B_я^2 G_{ст\,я}$, *вт*	90,9	89,14	87,93	85,18	82,36	79,31
$\Delta P_{ст\,Z} = 0{,}102 K_Z B_Z^2 G_{ст\,Z}$, *вт*	150,4	145,9	144,7	138,7	133,9	129,2
$\Delta P_{мя} = I_я^2 \sum R_{цян} = 0{,}383 I_я^2$, *вт*	152,8	344	661	955	1375,2	1872
$\Delta P_{мш} = I_ш^2 R_{шн} = 1{,}6^2 \cdot 137{,}5$, *вт*	352	352	352	352	352	352

Продолжение табл. Р.2

$\Delta P_{кщ} = \Delta U_{щ} I_{я}$, *вт*	24	60	91,5	110	132	154
$\Delta P_{тщ} = K_{т} \sum S_{щ} P_{щ} v_{к} = 3,27 \cdot 10^{-2} n$, *вт*	52,6	50,7	48,7	47,4	47,1	46,43
$\Delta P_{тп} + \Delta P_{в}$ по рис. 5.1, *вт*	62	60	60	58	58	58
$\Delta P_{д} \approx 0,008 P_1$, *вт*	38	56	80	90	108,4	126
$\sum \Delta P$, *вт*	922,6	1157,8	1526,1	1836	2 289	2817
$P_1 = U (I_{я} + I_{ш})$, *вт*	4752	6952	9504	11 352	13 552	15 752
$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$, *вт*	3832,4	5794,2	7977,9	9516	11 263	12 935
$M_2 = 9,55 \frac{p_2}{n}$, *нм*	22,73	35,7	51,1	62,5	74,6	86,85
$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$	80,6	83,3	83,9	83,8	83,1	82,1

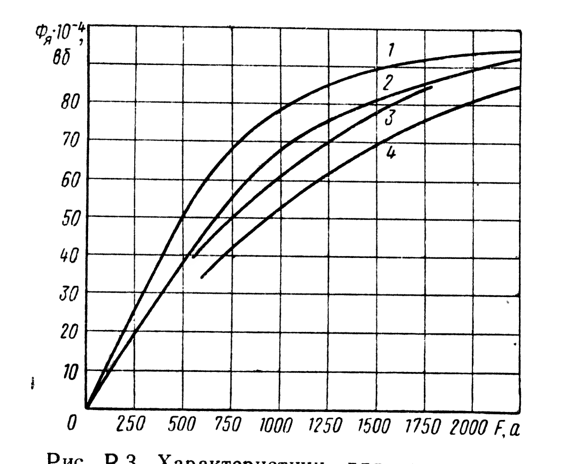


Рис. Р.3. Характеристики для тока якоря $I_я = 70$ *а*:

1 — переходная при холостом ходе $\Phi_{яо} = f(F_{\delta+Z})$; *2* — намагничивания при холостом ходе $\Phi_{яо} = f(F_{\Sigma})$; *3* — переходная при нагрузке $\Phi_{я\,маг} = f(F_{\delta+Z})$; 4 — $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\Sigma})$

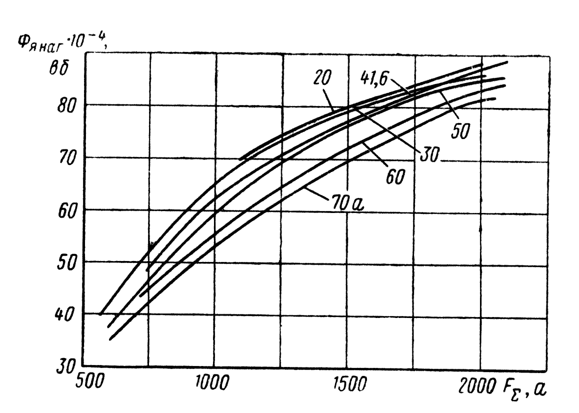


Рис. Р.4. Характеристики $\Phi_{я\,наг} = f(F_{\Sigma})$ для различных значений тока

3. Кратность пускового тока

$$\frac{I_к}{I_1}=\frac{307,5}{43,2}=7,1.$$

4. Определение потока при нагрузке $\Phi_{я\,наг}$ и построение кривых $\Phi_{я\,наг}=f(F_\Sigma)$ для различных значений тока якоря ($I_я=20$; 30; 41,6; 50; 60; 70 *а*) производится так же, как показано в § 5.2, п. 4.

На рис. Р.3 построены кривые $\Phi_{я0}=f(F_{\delta+z})$; $\Phi_{я0}=f(F_\Sigma)$; $\Phi_{я\,наг}=f(F_{\delta+z})$ и $\Phi_{я\,наг}=f(F_\Sigma)$ для тока якоря $I_я=70$ *а* (для других значений кривые не приведены).

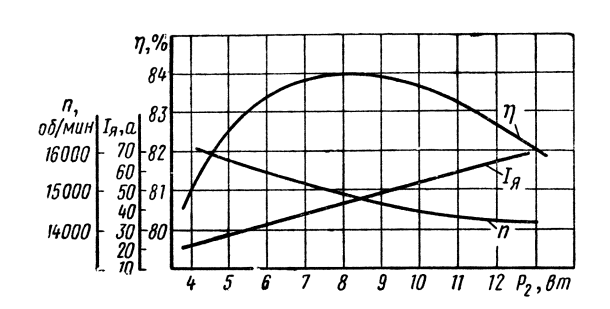


Рис. Р.5. Характеристики двигателя

На рис. Р.4 даны кривые $\Phi_{я\,наг}=f(F_\Sigma)$ для всех заданных значений тока якоря, на основе которых определялся $\Phi_{я\,наг}$ для данного значения F.

Расчет $\Delta\Phi_я$ и $\Phi_{я\,наг}=\Phi_я-\Delta\Phi_я=f(F_{\delta+z})$ для $\Phi_я=60\cdot10^{-4}$; $70\cdot10^{-4}$; $81,4\cdot10^{-4}$; $90\cdot10^{-4}$ *вб* проводился в соответствии с § 5.2, п. 4,а и приведен в табл. Р3:

$$\Delta\Phi_я=\Phi_я-\Phi_{яср},$$

где

$$\Phi_{яср}=\frac{1}{6}(\Phi_{я\,min}+4\Phi_я+\Phi_{я\,max}).$$

5. В расчете приближенно принято, что $\Delta P_д\approx0,008\,P_1$; за исключением значения, соответствующего номинальному значению тока якоря $I_я=41,6$ *а*, для которого в соответствии с (5.18) $\Delta P_д=0,01\,P_{2н}$.

6. Кратность пускового момента по (5.30)

$$m_п=\frac{\Phi_{як}I_{як}}{\Phi_{ян}I_{ян}}=\frac{97\cdot10^{-4}\cdot307,5}{81,4\cdot10^{-4}\cdot41,6}=8,46.$$

Характеристики двигателя даны на рис. Р.5.

Таблица Р.3

	Для $\Phi_я$			
	$60 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$	$81,4 \cdot 10^{-4}$	$90 \cdot 10^{-4}$
	при $I = 10$ *а*; $A = 48,75$ *а/см*; $0,5Ab_{i\,гн} = 198$			
$\Phi_{я\,min}$	41	56	77	87,5
$\Phi_{я\,max}$	72	78	85	92,5
$\Delta\Phi_я$	1	1	0	0
$\Phi_{я\,наг} = \Phi_я - \Delta\Phi_я$	$59 \cdot 10^{-4}$	$69 \cdot 10^{-4}$	$81,4 \cdot 10^{-4}$	$90 \cdot 10^{-4}$
	при $I = 20$*а*; $A = 97,5$ *а/см*; $0,5\ Ab_{i\,гн} = 396$			
$\Phi_{я\,min}$	30	36	68	83
$\Phi_{я\,max}$	78	83	88	94
$\Delta\Phi_я$	2	2	1,0	0,5
$\Phi_{я\,наг} = \Phi_я - \Delta\Phi_я$	$58 \cdot 10^{-4}$	$68 \cdot 10^{-4}$	$80,4 \cdot 10^{-4}$	$89,5 \cdot 10^{-4}$
	при $I = 30$ *а*; $A = 146,25$ *а/см*; $0,5Ab_{i\,гн} = 594$			
$\Phi_{я\,min}$	9	25	62	81,4
$\Phi_{я\,max}$	80	82	90	94
$\Delta\Phi_я$	5	3,33	1,8	0,95
$\Phi_{я\,наг} = \Phi_я - \Delta\Phi_я$	$55 \cdot 10^{-4}$	$66,6 \cdot 10^{-4}$	79,6	89
	при $I = 41,6$ *а*; $A = 202,8$ *а/см*; $0,5\ Ab_{i\,гн} = 824$			
$\Phi_{я\,min}$	—23	—0,5	31	73
$\Phi_{я\,max}$	86	90	93	94

$\Delta\Phi_я$	9,5	8,3	6,5	2
$\Phi_{я\,наг}=\Phi_я-\Delta\Phi_я$	$50,5\cdot10^{-4}$	$61,7\cdot10^{-4}$	$74,9\cdot10^{-4}$	$88\cdot10^{-4}$
	при $I=50$ *a*; $A=244$ *а/см*; $0,5\,Ab_{i\,гн}=993$			
$\Phi_{я\,min}$	—40	—23	15	62
$\Phi_{я\,max}$	90	91	94	95
$\Delta\Phi_я$	12	12	9	4
$\Phi_{я\,наг}=\Phi_я-\Delta\Phi_я$	$48\cdot10^{-4}$	$58\cdot10^{-4}$	$72,4\cdot10^{-4}$	$86\cdot10^{-4}$
	при $I=60$ *a*; $A=292,5$ *а/см*; $0,5Ab_{i\,гн}=1190$			
$\Phi_{я\,min}$	—60	—47,5	—7,5	45
$\Phi_{я\,max}$	92	92,5	93	93
$\Delta\Phi_я$	16	16	12,6	7
$\Phi_{я\,наг}=\Phi_я-\Delta\Phi_я$	$44\cdot10^{-4}$	$54\cdot10^{-4}$	$68,8\cdot10^{-4}$	$83\cdot10^{-4}$
	при $I=70$ *a*; $A=341$ *а/см*; $0,5\,Ab_{i\,гн}=1388$			
$\Phi_{я\,min}$	—71	—62	—30	20
$\Phi_{я\,max}$	93	94	94	95
$\Delta\Phi_я$	16,3	18	16,5	10,63
$\Phi_{я\,наг}=\Phi_я-\Delta\Phi_я$	$43,7\cdot10^{-4}$	$52\cdot10^{-4}$	$65\cdot10^{-4}$	$79,4\cdot10^{-4}$

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Международная система единиц (СИ)

1. Единицы электрических и магнитных величин

Физическая величина и ее обозначение	Единицы системы СИ				Единицы системы СГС		
	определяющее уравнение	название единицы, определение	обозначение единицы	размерность	определяющее уравнение	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ
Сила электрического тока I, i	Основное	ампер	*а*	*а*	$I = \frac{q}{t}$	ед. тока СГС ($см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$)	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$
Количество электричества q	$q = It$ (t — время)	кулон ($а \cdot сек$)	*к*	$а \cdot сек$	$q = \sqrt{Fr^2}$	ед. кол. электричества СГС ($см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$
Напряжение U Потенциал φ Э. д. с. E	$U = \frac{A}{q}$ (A — работа)	вольт ($дж/к$)	*в*	$кг \cdot м^2/(а \cdot сек^3)$	$U = \frac{A}{q}$	ед. потенциала СГС ($см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	300
Напряженность электрического поля E	$E = \frac{U}{l}$ (l — длина)	вольт на метр	*в/м*	$кг \cdot м/(а \cdot сек^3)$	$E = \frac{F}{q}$	ед. напряженности СГС ($см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	$3 \cdot 10^4$
Электрическое сопротивление R	$R = \frac{U}{I}$	*ом* ($в/а$)	*ом*	$кг \cdot м^2/(а^2 \cdot сек^3)$	$R = \frac{U}{I}$	ед. сопротивления СГС ($см^{-1} \cdot сек$)	$9 \cdot 10^{11}$

Физическая величина и ее обозначение	Единицы системы СИ				Единицы системы СГС		
	определяющее уравнение	название единицы, определение	обозначение единицы	размерность	определяющее уравнение	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ
Удельное сопротивление ρ	$\rho = \frac{RS}{l}$	ом-метр	*ом·м*	$кг \cdot м^3/(а^2 \cdot сек^3)$	$\rho = \frac{RS}{l}$	ед. уд. сопр. СГС (*сек*)	$9 \cdot 10^9$
Электрическая проводимость q	$q = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$	сименс	*сим* $ом^{-1}$	$а^2 \cdot сек^3/(кг \cdot м^2)$	$q = \frac{1}{R}$	ед. проводимости СГС ($см \cdot сек^{-1}$)	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$
Удельная проводимость	$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{Gl}{S}$	сименс на метр	$ом^{-1} \times м^{-1}$	$а^2 \cdot сек^3/(кг \cdot м^3)$	$\sigma = \frac{1}{\rho}$	ед. уд. пров. СГС ($сек^{-1}$)	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-9}$
Электрическая емкость C	$C = \frac{q}{U}$	фарада (*к/в*)	*ф*	$а^2 \cdot сек^4/(кг \cdot м^2)$	$C = \frac{q}{U}$	ед. емкости СГС (*см*)	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$
Магнитный поток Φ	$\Phi = Et$	вебер ($в \cdot сек$)	*вб*	$кг \cdot м^2/(а \cdot сек^2)$	$\Phi = BS$	максвелл (*мкс*) ($см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	10^{-8}
Магнитная индукция B	$B = \frac{\Phi}{S}$	тесла ($вб/м^2$)	*тл*	$кг/(а \cdot сек^2)$	$B = \mu H$	гаусс (*гс*) ($см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	10^{-4}

Магнитодвижущая сила F	$F = wI$ (w — количество витков)	ампер	*а*	*а*	$F = Hl$	ед. магнитодвиж. силы СГС ($см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	$\frac{10}{4\pi}$
Напряженность магнитного поля H	$H = \frac{I}{l} = \frac{I}{2\pi r}$	ампер на метр	*а/м*	*а/м*	$H = \frac{2I}{C_0 r}$	эрстед (*э*) ($см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$)	$\frac{1000}{4\pi} = 79{,}6$
Индуктивность L Взаимная индуктивность M	$L = \frac{E\Delta t}{\Delta I}$	генри (*в·сек/а*)	*гн*	$кг \cdot м^2/(а^2 \cdot сек^2)$		ед. индуктивности СГС (*см*)	10^{-9}
Магнитная проницаемость (абсолютная) $\mu_а$	$\mu_а = \frac{B}{H} = \frac{LI}{n^2 S}$	генри на метр	*гн/м*	$кг \cdot м/а^2 \cdot сек^2$	$\mu = \frac{L}{L_0}$		$1{,}256 \cdot 10^{-6}$
Электрическая энергия W	$W = A$ (A — работа)	джоуль	*дж*	$кг \cdot м^2/сек^2$	$W = A$	эрг ($см^2 \cdot г \cdot сек^{-2}$)	10^{-7}
Активная мощность электрического тока P	$P = U_{эф} I_{эф} \times \times \cos\varphi$ (эф — эффективное значение)	ватт	*вт*	$кг \cdot м^2/сек^3$	$P = \dot{U}_{эф} \times \times I_{эф} \cos\varphi$	*эрг/сек* ($см \cdot г \cdot сек^{-3}$)	10^{-7}
Полная мощность S	$S = U_{эф} I_{эф}$	вольт-ампер	*в·а*	$кг \cdot м^2/сек^3$			

2. Единицы механических и термодинамических величин

Физическая величина и ее обозначение	Единицы системы СИ				Единицы системы СГС		Единицы системы МКГСС (метр-килограмм-сила-секунда)		
	определяющее уравнение	название единицы	обозначение единицы	размерность	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ	определяющее уравнение	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ
Длина l, r, d, a	Основное	метр	*м*	*м*	сантиметр *см*	10^{-2}	Основное	метр *м*	1
Масса m	Основное	килограмм	*кг*	*кг*	грамм *г*	10^{-3}	$m = \frac{F}{a}$	т. е. м. (*кГ·сек²/м*)	9,80665
Время t, T, τ	Основное	секунда	*сек*	*сек*	секунда *сек*	1	Основное	секунда *сек*	1
Плоский угол α, β	$\alpha = \frac{l}{r}$	радиан	*рад*		радиан *рад*	1		*рад*	1
Площадь S	$S = l^2$	квадратный метр	$м^2$	$м^2$	$см^2$	10^{-4}	$S = l^2$	$м^2$	1
Объем V	$V = l^3$	кубический метр	$м^3$	$м^3$	$см^3$	10^{-6}	$V = l^3$	$м^3$	1
Скорость v	$v = \frac{s}{t}$	метр в секунду	*м/сек*	$м \cdot сек^{-1}$	*см/сек*	10^{-2}	$v = \frac{s}{t}$	*м/сек*	1

Ускорение a	$a = \frac{v}{t}$	метр на секунду в квадрате	*м/сек*^{2}	*м·сек*$^{-2}$	*см/сек*^{2} (*см·сек*$^{-2}$)	10^{-2}	$a = \frac{v}{t}$	*м/сек*^{2}	1
Сила F Вес P	$F = ma$ $P = mq$	ньютон (*кг·м/сек*^{2})	*н*	*кг·м·сек*$^{-2}$	дина *дин* (*г·см*$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$)	10^{-5}	Основная	килограмм-сила *кГ*	9,80665
Работа A Энергия W	$A = Fs$ $W = A$	джоуль (*н·м*)	*дж*	*кг·м*^{2}*·сек*$^{-2}$	эрг (*г·см*$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$)	10^{-7}	$A = Fs$	килограмм-сила-метр *кГ·м*	9,80665
Мощность P, N	$P = \frac{A}{t}$	ватт (*дж/сек*)	*вт*	*кг·м*^{2}*·сек*$^{-3}$	*эрг/сек* (*г·см*^{2}$\times$ $\times$*сек*$^{-3}$)	10^{-7}	$P = \frac{A}{t}$	*кГ·м/сек*	9,80665
Плотность D, ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	килограмм на куб. метр	*кг/м*^{3}	*кг·м*$^{-3}$	*г/см*^{3} (*г·см*$^{-3}$)	10^3	$\rho = \frac{m}{V}$	(т. е. *м.*)/*м*^{3} (*кГ·м*$^{-4}$*·сек*^{2})	9,80665
Давление p	$p = \frac{F}{S}$	ньютон на кв. метр	*н/м*^{2}	*кг·м*$^{-1}$$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$	*дин/см*^{2} (*г·см*$^{-1}$$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$)	10^{-1}	$p = \frac{F}{S}$	*кГ/м*^{2}	9,80665
Удельный вес γ	$\gamma = \frac{P}{V}$	ньютон на куб. метр	*н/м*^{3}	*кг·м*$^{-2}$$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$	*дин/см*^{3} (*г·см*$^{-2}$$\times$ $\times$*сек*$^{-2}$)	10	$\gamma = \frac{P}{V}$	*кГ/м*^{3}	9,80665
Частота f	$f = \frac{1}{T}$ (**T — период**)	**герц**	***гц***	***сек*$^{-1}$**	***гц* (*сек*$^{-1}$)**	1	$f = \frac{1}{T}$	***гц***	1

Физическая величина и ее обозначение	Единицы системы СИ				Единицы системы СГС		Единицы системы МКГСС (метр-килограмм-сила-секунда)		
	определяющее уравнение	название единицы	обозначение единицы	размерность	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ	определяющее уравнение	название и обозначение единицы, размерность	содержит количество единиц СИ
Угловая скорость ω	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	радиан в секунду	*рад/сек*	*сек*$^{-1}$	*рад/сек* (*сек*$^{-1}$)	1	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	*рад/сек* (*сек*$^{-1}$)	1
Момент силы *M*	$M = Fr$	ньютон-метр	*н·м*	*кг·м*^{2}*·сек*$^{-2}$	*дин·см* (*г·см*^{2} × *сек*$^{-2}$)	10^{-7}	$M = Fr$	*кГ·м*	9,80665
Момент инерции (динамический) *J*	$J = mr^2$	килограмм-метр в квадрате	*кг·м*^{2}	*кг·м*^{2}	*г·см*^{2}	10^{-7}	$J = mr^2$	(т. е. *м*.)·*м*^{2} (*кГ·м·сек*^{2})	9,80665
Теплоемкость *C*	$C = \frac{Q}{\Delta T}$	джоуль на градус	*дж/град*	$\frac{кг \cdot м^2}{сек^2 \cdot град}$	*эрг/град*	10^{-7}	$C = \frac{Q}{\Delta T}$		
Удельная теплоемкость *c*	$c = \frac{Q}{m\Delta T}$	джоуль на килограмм-градус	$\frac{дж}{кг \cdot град}$	$\frac{м^2}{сек^2 \cdot град}$	$\frac{эрг}{г \cdot град}$	10^{-4}	$c = \frac{Q}{m\Delta T}$		
Коэффициент теплопроводности λ	$\lambda = \frac{Q\Delta l}{st\Delta T}$	ватт на метр-градус	*вт/м* × *град*	$\frac{кг \cdot м}{сек^3 \cdot град}$	$\frac{эрг}{см \cdot сек \times град}$	10^{-5}			
Коэффициент теплообмена (теплоотдачи) α	$\alpha = \frac{Q}{St(T_2 - T_1)}$	ватт на кв. метр-градус	*вт/м*^{2} × *град*	$\frac{кг}{сек^3 \cdot град}$	$\frac{эрг}{сек \cdot см^2 \times град}$	10^{-3}			

Таблица расчетных данных некоторых электродвигателей единой серии П

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Исполнение по роду защиты	Защищенное								
Исполнение по роду охлаждения	Аксиальная самовентиляция								
Режим работы	Длительный								
Род возбуждения	Параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой								
Мощность $P_{2н}$, *квт*	1,5	3,2	6	11	19	25	55	100	200
Скорость вращения $n_н$, *об/мин*	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Напряжение $U_н$, *в*	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Ток I_1, *а*	8,3	18,4	33,2	59,8	101,7	130,8	283	502	988
Коэффициент полезного действия η, %	78,5	79,0	82,5	84	84,7	86,7	89	90,7	92,2
Размеры магнитопровода									
Якорь									
Внешний диаметр якоря $D_я$, *см*	12,0	13,8	16,2	19,5	21,0	21,0	29,4	32,7	36,8
Внутренний диаметр якоря $a_я$, *см*	3,0	4,2	5,5	5,6	6,5	6,5	8,5	10,0	11,5
Длина якоря $l_я$, *см*	7,5	8,5	10,0	5,6	12,5	16,5	15,0	19,0	26,5
Отношение длины якоря к диаметру $\lambda_я$	0,625	0,616	0,617	0,54	0,595	0,785	0,511	0,583	0,72
Полюсное деление τ, *см*	18,75	10,82	12,65	15,3	16,5	16,5	23,1	25,7	28,9
Число аксиальных каналов $n_а$	—	—	—	—	15	15	21	24	27
Диаметр аксиального канала $d_а$, *см*	—	—	—	—	1,7	1,7	2,2	2,2	2,4

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Число пазов z	18	27	31	31	33	27	37	38	42
Высота паза $h_п$, *мм*	20	25,4	27,0	29	27	27	34	34	34
Ширина открытого паза $b_п$, *мм*	—	—	—	—	7,3	8,7	8,7	9,5	9,2
Толщина листов якоря $\Delta_я$, *мм*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Марка стали	Э12	Э12	Э12	Э12	Э12	Э12	Э12	Э12	Э12
Главные полюсы									
Число полюсов $2p$	2	4	4	4	4	4	4	4	4
Ширина полюса $b_г$, *см*	4,8	3,6	4,4	5,3	6	6	10	12	14,5
Высота полюса $h_г$, *см*	5,66	6,0	6,78	7,85	8,35	8,35	11,3	11,95	12,6
Длина полюса $l_г$, *см*	7,5	8,5	10,0	10,5	12,5	16,5	15,0	19	26,5
Коэффициент полюсного перекрытия α_i	0,67	0,63	0,64	0,65	0,63	0,63	0,64	0,66	0,68
Ширина полюсной дуги $b_{гн}$, *см*	3,13	6,83	8,1	9,95	10,4	10,4	14,8	17,0	19,6
Воздушный зазор между полюсами и якорем δ, *см*	0,09	0,1	0,12	0,15	0,15	0,15	0,2	0,25	0,3
Толщина листа полюса $\Delta_г$, *мм*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Марка стали	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330
Добавочные полюсы									
Число полюсов $2p_д$	1	4	4	4	4	4	4	4	4
Длина полюса $l_д$, *см*	5,5	6,5	8,0	8,5	12,5	16,5	15,0	19,0	26,5
Ширина полюса $b_д$, *см*	2,6	2,0	2,2	2,7	2,5	2,5	3,5	4,0	4,5
Высота полюса $h_д$, *см*	5,63	5,95	6,73	7,65	8,23	8,23	11,0	11,5	12,1
Длина полюсного наконечника $l_{дн}$, *см*	7,5	8,5	10,0	10,5	12,5	16,5	15,0	19,0	26,5

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Ширина полюсного наконечника $b_{дн}$, *см*.	—	—	—	—	2,0	2,0	2,8	3,2	3,6
Высота полюсного наконечника $h_{дн}$	0,6	0,6	0,8	0,8	0,25	0,25	0,35	0,4	0,45
Воздушный зазор между полюсом и якорем $\delta_д$, *см*	0,12	0,15	0,17	0,35	0,27	0,27	0,37	0,4	0,45
Толщина листа полюса $\Delta_д$, *мм*	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Марка стали	Э11	Э11	Э11	Э11	Э330	Э330	Э330	Э330	Э330
Станина									
Внешний диаметр станины D_c, *см*	26,9	28,9	33,5	39,7	42,8	42,8	59,2	65,5	72,2
Внутренний диаметр станины d_c, *см*	23,5	26,0	30,0	35,5	38,0	38,0	53,0	57,5	63,0
Длина станины l_c, *см*	16,5	15,0	17,5	20,0	24,5	28,5	34,0	40,0	50,5
Высота станины h_c, *см*	1,7	1,45	1,75	2,1	2,4	2,4	3,1	4,0	4,6
Марка стали	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3	Ст3
Обмотка якоря									
Тип обмотки	петл.	волн.	волн.	волн.	волн.	волн.	волн.	петл.	петл.
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	4	4
Число эффективных проводов обмотки $N_я$	1404	918	682	496	396	324	222	304	168
Число витков в секции $w_{cя}$	10—9 10—10	6—5—6	4—3—4	3—2—3	2	2	1	1	1
Число эффективных проводов в пазу $N_п$	78	34	22×2	3×16	12	12	6	8	4
Число проводов по ширине паза $u_п$	—	—	—	—	3	3	3	4	2

Продолжение прилож. 2

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Число проводов в пазу по высоте паза $u_в$	—	—	—	—	4	4	4	4	4
Марка провода	ПЭВ-2	ПЭТСО	ПЭТСО	ПЭТСО	ПСД	ПСД	ПСД	ПСД	ПСД
Размер голого провода, *мм*	1,0	1,25	1,16	1,3	1,35×4,7	1,81×4,7	1,81×6,4	1,56×6,4	3,05×6,4
Размер изолированного провода, *мм*	1,11	1,49	1,4	1,54	1,62×4,97	2,08×4,97	2,08×6,67	1,83×6,67	3,38×6,73
Сечение провода $q_я$, *мм²*	0,785	1,227	2×1,057	1,327	6,14	8,3	2×11,4	2×9,77	2×19
Средняя длина витка $l_{ср\,я}$, *м*	0,47	0,408	0,48	0,546	0,71	0,79	0,93	1,04	1,27
Сопротивление обмотки якоря при 20° С, $R_я$, *ом*	1,85	0,67	0,34	0,15	0,101	0,0676	0,0198	0,00885	0,00308
Ток в обмотке якоря $I_я$, *а*	8,3	17,36	32	58,46	100	129	280	498	980
Обмотка добавочных полюсов									
Число витков в катушке $w_д$	256	67	53	39	32	26	18	12	13
Размер голого провода, *мм*	1,88	2,44	2,63×4,1	2,44×5,5	1,45×18	1,95×18	2,63×25	2,63×25	2,63×25
Размер изолированного провода, *мм*	2,15	2,77	2,96×4,43	2,77×5,83	—	—	—	—	—
Марка провода	ПБД	ПСД	ПСД	ПСД	МГМ	МГМ	МГМ	МГМ	МГМ
Средняя длина витка $l_{ср.д}$	0,31	0,245	0,285	0,31	0,4	0,48	0,494	0,6	0,765
Сопротивление обмотки при 20° С $R_д$, *ом*	0,501	0,246	0,102	0,06	0,035	0,0255	0,00972	0,00394	0,00136

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Последовательная (сериесная) обмотка возбуждения									
Марка провода	ПБД	ПСД	ПСД	ПСД	МГМ	МГМ	МГМ	МГМ	МГМ
Число витков в катушке $w_с$	20	12	10	8	4	3	3	3	3
Размер голого провода, *мм*	1,95	2,44	1,81×5,9	2,44×5,5	1,45×18	1,85×18	2,63×25	2,63×25	2,63×25
Размер изолированного провода, *мм*	2,22	2,77	2,08×6,17	2,77×5,83	—	—	—	—	—
Сечение провода $q_с$, *мм²*	2,987	4,68	10,5	12,9	25,7	34,3	64,3	2×64,3	2×64,3
Средняя длина витка $l_{ср.с}$, *м*	0,34	0,335	0,395	0,435	0,45	0,53	0,6	0,72	0,93
Сопротивление всех катушек при 20° С $R_с$	0,08	0,603	0,0268	0,019	0,00492	0,00325	0,00196	0,00059	0,000378
Параллельная (шунтовая) обмотка возбуждения									
Напряжение возбуждения $U_в$, *b*	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Число витков в катушке $w_ш$	4500	1250	1300	1400	1250	1100	1000	950	750
Марка провода	ПЭВ-2	ПЭТСО	ПЭТСО	ПЭТСО	ПЭТСО	ПЭТСО	ПСД	ПСД	ПСД
Размер голого провода, *мм*	0,41	0,49	0,59	0,67	0,64	0,8	1,16	1,35	1,68
Размер изолированного провода, *мм*	0,47	0,7	0,8	0,88	0,81	0,98	1,43	1,62	1,95
Сечение провода $q_ш$, *мм²*	0,132	0,1885	0,273	0,352	0,4301	0,503	1,057	1,43	2,217

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Средняя длина витка $l_{ср.ш}$, *мм*	0,41	0,335	0,395	0,435	0,49	0,57	0,663	0,81	1,01
Сопротивление всех катушек при 20° С $R_{ш}$, *ом*	490	156	132	121	100	87,3	44	37,8	24
Коллектор и щетки									
Внешний диаметр коллектора $D_{к}$, *см*	8	10	12,5	12,5	15	15	20	23	25
Число коллекторных пластин K	72	81	93	93	99	81	111	152	84
Коллекторное деление $\tau_{к}$, *см*	0,349	0,388	0,423	0,423	0,475	0,584	0,566	0,475	0,935
Число щеток на болт $N_{щб}$	2	2	2	3	2	3	4	5	6
Размер щетки, *мм*	10×12,5	10×12,5	10×12,5	10×12,5	12,5×25	12,5×25	16×25	16×32	25×32
Марка щетки	ЭГ4	ЭГ4	ЭГ4	ЭГ4	ЭГ4	ЭГ4	ЭГ4	ЭВ4	ЭГ4
Электромагнитные нагрузки									
Магнитный поток якоря на полюс $\Phi_{я}$, *вб*	$0{,}55\cdot10^{-2}$	$0{,}425\cdot10^{-2}$	$0{,}58\cdot10^{-2}$	$0{,}804\cdot10^{-2}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}24\cdot10^{-2}$	$1{,}85\cdot10^{-2}$	$2{,}75\cdot10^{-2}$	$5{,}03\cdot10^{-2}$
Суммарная м. д. с. на один полюс F_{Σ}	1742	1167	1500	2011	2190	1850	3227	3851	4875
Размагничивающее действие реакции якоря $F_{яр}$, *а*	116	150	205	270	375	540	600	760	785
Магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{б}$, *тл*	0,583	0,735	0,716	0,77	0,770	0,723	0,835	0,852	0,967
Магнитная индукция в зубцах Bz_{max}, *тл*	2,22	1,93	1,86	2,0	2,2	2,0	2,21	2,175	2,23

Продолжение прилож. 2

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Магнитодвижущая сила зубцов F_Z, *а*	760	162	320	580	346	152	520	500	786
Магнитная индукция в спинке якоря $B_я$, *тл*	1,58	1,185	1,18	1,01	1,26	1,18	1,19	1,20	1,335
Магнитодвижущая сила спинки якоря на полюс $F_я$, *а*	129	14	18,6	13,7	48	38	57	67	121
Магнитная индукция в станине $B_с$, *тл*	1,13	1,12	1,10	1,10	1,02	1,085	1,06	1,03	1,3
Магнитодвижущая сила станины $F_с$	222	120	137	162	163	181	244	254	460
Магнитодвижущая сила воздушного зазора станины (стыка) $F_{ст}$, *а*	141	128	122	133	134	126	125	123	134
Магнитная индукция в сердечнике главного полюса $B_г$, *тл*	1,83	1,66	1,58	1,73	1,675	1,58	1,56	1,52	1,65
Магнитодвижущая сила главных полюсов $F_г$	108	48	47,5	82,5	78	62	81	78	112
Средняя индукция в зазоре под наконечником добавочного полюса $B_д$, *тл*	0,272	0,091	0,178	0,122	0,152	0,126	0,185	0,197	0,163
Плотность тока в обмотке якоря $j_я$, *а/мм²*	5,28	7,0	7,56	3×1,33	8,15	7,8	6,15	6,3	6,45
Плотность тока в обмотке добавочных полюсов $j_д$, *а/мм²*	2,98	3,67	3,1	4,52	3,9	3,76	4,35	3,88	3,83
Плотность тока в последовательной обмотке $j_с$, *а/мм²*	2,78	3,67	3,1	4,52	3,9	3,76	4,35	3,88	3,83

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Плотность тока в параллельной обмотке $j_{ш}$, *а/мм²*	2,83	5,5	4,5	3,81	4,0	3,62	2,82	2,64	2,52
Плотность тока под щетками $j_{щ}$, *а/мм²*	3,32	3,48	6,4	7,8	8,1	6,85	8,7	9,8	10,3
Линейная нагрузка якоря A, *а/см*	155	185	214	237	300	317	337	369	358
Тепловая нагрузка якоря $Aj_{я}$	820	1295	1620	1740	2450	2470	2070	2320	2310
Коммутация									
Реактивная э. д. с. $e_{р}$, *в*	3,0	1,90	2,12	3,32	1,26	1,38	1,27	1,92	2,5
Среднее напряжение между коллекторными пластинами $U_{к.ср}$, *в*	—	10,88	9,46	9,46	8,9	10,8	7,93	5,8	10,5
Потери и к. п. д.									
Электрические потери в обмотке якоря $\Delta P_{мя}$, *вт*	158	276	470	697	1395	1550	2140	3015	4100
Электрические потери в обмотке добавочных полюсов $\Delta P_{мд}$, *вт*	42,5	101	142	305	483	585	1050	1350	1810
Электрические потери в последовательной обмотке $\Delta P_{мс}$, *вт*	6,85	25	38	88	68	74,5	212	202	502
Электрические потери в параллельной обмотке $\Delta P_{мш}$, *вт*	82	229	270	295	414	400	540	745	1040

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Магнитные потери в стали зубцов и спинке якоря $\Delta P_{ст\,я}+\Delta P_{ст}Z$, *вб*	23,0	79	103	146	328	370,5	760	1163	2318
Электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе $\Delta P_{кщ}$, *вт*	16,6	34	64	117	200	258	560	1000	1964
Механические потери на трение и вентиляцию $\Delta P_{тп}+\Delta P_{в}$, *вт*	30	60	93	150	165	165	550	760	1150
Механические потери на трение щеток $\Delta P_{тщ}$, *вт*	—	—	—	—	145	145	492	910	1840
Добавочные потери $\Delta P_{д}$, *вт*	19	40	72	130	225	290	630	1110	2170
Сумма потерь ΣP, *вт*	379	844	1252	1928	3424	3838	6934	10255	16894
Потребляемая мощность P_1, *вт*	1910	4050	7300	13180	22424	28838	61934	110255	216894
Коэффициент полезного действия η, %	78,5	79	82,5	84	84,7	86,7	89,0	90,7	92,2
Вес									
Медь обмоточная якоря $G_{мя}$, *н*	22,6	20,1	30,2	47,1	75,5	92,7	201,1	277,6	353,16
Обмотка добавочных полюсов $G_{мд}$, *н*	19,3	26,9	54,4	54,9	114,8	149,1	199,1	322,7	447,336
Последовательная обмотка $G_{мс}$, *н*	3,6	6,0	14,2	15,6	16,2	19,0	40,2	48,6	126,549
Параллельная обмотка $G_{мш}$, *н*	44,1	27,4	49,0	74,6	92,2	109,9	245,3	382,6	588,60
Суммарный вес меди обмоток $\Sigma G_{м}$, *н*	89,6	81,0	147,8	192,2	298,7	370,7	605,7	1031,5	1515,6

Продолжение прилож. 2

Наименование	Типоразмеры								
	П31	П41	П51	П61	П71	П72	П91	П101	П111
Коллектор $G_{мк}$, *н*	10,6	26,9	19,9	30,1	91,0	118,2	257,0	490,5	677,0
Якорь $G_{я}$, *н*	36,8	58,8	91,4	153,0	193,3	255,1	457,1	730,8	1320,4
Главные полюсы $G_{г}$, *н*	39,2	58,8	100,0	125,6	220,7	288,4	593,5	878,0	1692,2
Добавочные полюсы $G_{д}$, *н*	7,8	23,5	35,9	54,9	78,5	104,0	176,6	266,8	441,5
Станина без лап $G_{с}$, *н*	169,7	142,2	241,3	382,6	570,9	667,0	1412,6	2364,2	3727,8
Суммарный вес стали $\Sigma G_{ст}$, *н*	253,5	283,3	468,6	716,1	1063,4	1314,5	2639,8	4235,0	7181,9
Конструктивные материалы $G_{кон}$, *н*	156,9	333,6	343,3	647,5	1097,5	1139,4	1911,0	3285,3	3771,9
Общий вес машины $G_{м}$, *н*	510,6	724,8	979,6	1585,9	2550,6	2942,8	5492,5	8142,3	13145,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Основные технические данные маломощных электродвигателей параллельного возбуждения ПЛ

Тип электродвигателя	Номинальные данные				К. п. д., %	Момент инерции якоря, *кг·см²*	Габариты, *мм*			
	мощность на валу, *вт*	скорость вращения, *об/мин*	ток, *а*, при напряжении 110 *в*	ток, *а*, при напряжении 220 *в*			длина корпуса с концом вала	наружный диаметр корпуса	длина конца вала	диаметр конца вала
ПЛ 051	30	2700	0,68	0,34	40	1,25	168	88,5	20	8
ПЛ 052	50	2700	0,96	0,48	47	1,75	183	88,5	20	8
ПЛ 061	80	2700	1,4	0,7	52	3,25	202	106	23	10
ПЛ 062	120	2700	1,9	0,95	57	4,0	218	106	23	10
ПЛ 071	180	2700	2,7	1,35	61	7,0	238	125	30	12
ПЛ 072	270	2700	3,8	1,9	65	8,75	258	125	30	12
ПЛ 081	400	2700	5,4	2,7	68	16,25	262	151	30	14
ПЛ 082	600	2700	7,6	3,8	72	22,0	298	151	30	14

Основные технические данные исполнительных электродвигателей постоянного тока СЛ

Система возбуждения	Тип электродвигателей	Номинальные данные						Момент инерции якоря, *кг·см²*	Габариты, *мм*				Масса, *кг*
		Напряжение, *в*	Мощность на валу, *вт*	Скорость вращения, *об/мин*	Вращающий момент, *кг·см²*	Ток возбуждения, *а*	Ток якоря, *а*		Длина корпуса с концом вала	Наружный диаметр корпуса	Длина конца вала	Диаметр конца вала	
Параллельного возбуждения	СЛ-121	110	5	4800	0,14	0,07	0,21	0,039	82	50	6,5	4	0,44
	СЛ-161	110	7	4800	0,21	0,08	0,22	0,053	94	50	7	4	0,50
	СЛ-221	110	13	3600	0,35	0,05	0,22	0,14	104	70	9,5	6	0,9
	СЛ-261	110	24	3600	0,65	0,08	0,42	0,2	115	70	9,5	6	1,25
	СЛ-281	24	26	5200	0,50	0,26	2,40	0,2	126,5	70	10	6	1,25
	СЛ-321	110	38	3000	1,25	0,11	0,7	0,6	123	85	13	8	1,7
	СЛ-361	110	50	3000	1,60	0,08	0,85	0,7	133	85	13	8	1,95
	СЛ-521	110	77	3000	2,50	0,1	1,2	1,7	148	108	16	10	3,3
	СЛ-569	110	175	3400	4,75	0,11	2,2	2,7	173	108	16	10	4,5
	СЛ-621	110	172	2400	7,00	0,16	2,2	6,75	188	130	16	10	7,5
	СЛ-661	110	230	2400	9,25	0,18	3,4	9,35	218	130	16	10	9,7
Параллельного возбуждения для потенциометрических схем	СЛ-267	110	27	3800	0,65	0,08	0,9	0,2	115	70	9,5	6	1,25
	СЛ-367	110	32	2500	1,25	0,08	1,0	0,7	133	85	13	8	2,0
Параллельного возбуждения стабилизированной скорости с центробежным регулятором	СЛ-240	22	18,5	4500	0,40	0,32	2,5	—	156	70	9,5	6	1,4
	СЛ-360	110	23	4500	0,50	0,06	0,6	0,75	180	85	13	8	2,2
	СЛ-370	22	28	4500	0,60	0,32	3,0	0,75	180	85	13	8	2,2
	СЛ-570	110	77	3000	2,50	1,15	1,2	3,6	248	108	16	10	6,16
Последовательного возбуждения, нереверсивные	СЛ-525	110	78	3800	2,0	1,2	1,2	1,7	196	108	36	9	3,3
	СЛ-525А	24	30	2800	1,0	3,0	3,0	1,7	173	108	16	10	3,3
Последовательного возбуждения, реверсивные	СЛ-163	110	10	3500	0,23	0,26	0,26	0,53	100	50	7	4	0,55
	СЛ-523	110	74	3000	0,24	1,1	1,1	1,7	148	108	16	10	3,3
	СЛ-563	110	110	3800	0,28	1,5	1,5	2,7	173	108	16	10	4,5

Диаметры якорных листов до 990 *мм* включительно

Диаметр, *мм*	Штампуется из листа, *мм*	Припуск на штамповку (на обе стороны), *мм*	Диаметр, *мм*	Штампуется из листа, *мм*	Припуск на штамповку (на обе стороны), *мм*
83	700×1400	4	245	1000×2000 750×1500	5
96	700×1400 800×1600 1000×2000	4	261	800×1600	6
106	1000×2000	5	294	600×1200	6
120	750×1500 1000×2000	5	327	1000×2000	6
138	860×1720 1000×2000	5	368	750×1500	7
145	750×1500 600×1200	5	423	860×1720	7
162	1000×2000 670×1340	5	493	1000×2000	7
182	750×1500	5	590	600×1200	10
195	1000×2000 800×1600 600×1200	5	660	670×1340	10
210	860×1720	5	740	750×1500	10
228	700×1400	5	850	860×1720	10
			990	1000×2000	10

Характеристики основных марок медных изолированных обмоточных проводов

Марка провода	Номер ГОСТ или ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °С
ПЭЛ	2773—51	Круглый эмалированный лакостойкий	А	105
ПЭТ	2773—51	Круглый эмалированный лакостойкий, с повышенной нагревостойкостью	Е и В	125
ПЭТ-2		Круглый с двухслойной эмалью		+155 длительно +180 в течение 700 *ч*
ПЭТВ, ПЭТВО ПЭТВ-939 ПЭТВ-ТС	МРТУ 2.43.12—61	Круглый и прямоугольный ПЭТВП, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости	Е и В	130 200 в течение 500 *ч*
ПЭВ-1	7262—54	Круглый, изолированный высокопрочной эмалью, однослойный	А	110
ПЭВ-2	7262—54	Круглый, изолированный высокопрочной эмалью, двухслойный	А	110
ПЭЛШО и ПЭЛШКО	6324—52	Круглый и прямоугольный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка (ПЭЛШО) или шелка капрон (ПЭЛШКО)	А	105
ПЭЛБО	6324—52	Круглый и прямоугольный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	А	105
ПЭЛКО	6324—52	Круглый и прямоугольный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из утолщенного шелка капрон		
ПЭТСО	7019—60	Круглый и прямоугольный, изолированный эмалью и одним слоем обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	В	130
ПБО	6324—52	Круглый и прямоугольный, изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	А	105

Марка провода	Номер ГОСТ или ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °C
ПБД	6324—52	Круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи	A	105
ПСД	7019—60	Круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	B, F	150
ПЭТСОТ	7019—60	Нагревостойкий, круглый или прямоугольный, изолированный эмальлаком и одним слоем обмотки из утонченного бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	B	130
ПЭТКСО	ВТУ МЭП ОАА. 505. 013—52	Нагревостойкий, круглый, изолированный нагревостойкой эмалью и одним слоем обмотки из бесщелочного волокна, с применением кремнийорганического лака	H	180
ПЭТКСОТ	ТУКП 19—58 ТУКП 90—60	Нагревостойкий, круглый (ТУКП19—58) и прямоугольный (ТУКП90—60), изолированный нагревостойкой эмалью и одним слоем стекловолокна, подклеенного и пропитанного нагревостойким лаком	H	18
ПСДТ	7019—60	Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из утонченного бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	F	155
ПДА	7019—60	Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный одним слоем асбестовой ровницы с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	F	155

Марка провода	Номер ГОСТ или ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °С
ПСДК	7019—60	Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	Н	180
ПСОТ	ТУХП 17—58	Особо теплостойкий, круглый и прямоугольный с однослойной обмоткой из тонкого бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	Н	300 в течение не менее 250 *ч*
ПСДКТ	ТУКП 18—58	Особо теплостойкий круглого и прямоугольного сечения с утонченной двухслойной обмоткой из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	Н	300 в течение 250 *ч*
ПСДКТ-М	МРТУ 16.505.019—65	Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями из утонченного бесщелочного стекловолокна с подклейкой к меди и между слоями и лакировкой поверхности провода кремнийорганическим лаком	Н	180 *

* Провод может быть использован также в эксплуатации при более высоких температурах:

Форма сечения провода	Допустимое время эксплуатации, *ч* при температуре эксплуатации, °С			
	250	300	350	400
Круглый	1500	300	200	25
Прямоугольный	3000	1000	250	50

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Номинальные диаметры и сечения круглой обмоточной меди

Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$
0,05	0,00196	0,25	0,0491	0,67	0,353	1,30	1,327
0,06	0,00283	0,27	0,0573	0,69	0,374	1,35	1,431
0,07	0,00385	0,29	0,0661	0,72	0,407	1,40	1,539
0,08	0,00503	0,31	0,0755	0,74	0,430	1,45	1,651
0,09	0,00636	0,33	0,0855	0,77	0,466	1,50	1,767
0,10	0,00785	0,35	0,0962	0,80	0,503	1,56	1,911
0,11	0,00950	0,38	0,1134	0,83	0,541	1,62	2,06
0,12	0,01131	0,41	0,1320	0,86	0,581	1,68	2,22
0,13	0,01327	0,44	0,1521	0,90	0,636	1,74	2,38
0,14	0,01539	0,47	0,1735	0,93	0,679	1,81	2,57
0,15	0,01767	0,49	0,1886	0,96	0,724	1,88	2,78
0,16	0,0201	0,51	0,204	1,00	0,785	1,95	2,99
0,17	0,0227	0,53	0,221	1,04	0,849	2,02	3,20
0,18	0,0255	0,55	0,238	1,08	0,916	2,10	3,46
0,19	0,0284	0,57	0,255	1,12	0,985	2,26	4,01
0,20	0,0314	0,59	0,273	1,16	1,057	2,44	4,68
0,21	0,0346	0,62	0,302	1,20	1,131	2,63	5,43
0,23	0,0415	0,64	0,322	1,25	1,227	2,83	6,29
						3,05	7,31
						3,28	8,45

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Классификация электроизоляционных материалов по нагревостойкости

Классы нагревостойкости	Допустимая температура, °C	Краткая характеристика
У	90	Непропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
А	105	Пропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
Е	120	Некоторые синтетические органические пленки
В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста, стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими, или элементо-органическими связующими составами

Номинальные размеры (*мм*) и расчетные сечения (*мм*^{2}) прямоугольной проволоки (ГОСТ 434—53)

b \ a	0,83	0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,5	1,56	1,68	1.81	1,95	2,0	2,1	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83
2,1	1,60	1,72	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	—	3,07	3,32	3,59	—	—	3,92	—	—	—	—	—
2,26	—	1,86	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	—	3,32	3,59	3,88	—	—	—	4,63	—	—	—	—
2,44	—	2,03	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	—	3,60	3,89	4,21	4,56	—	4,64	—	5,37	—	—	—
2,63	—	2,20	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	—	3,80	4,21	4,55	4,92	—	5,04	5,46	5,94	—	6,44	—
2,83	—	2,38	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	—	4,20	4,54	4,91	5,31	—	5,46	5,92	6,43	—	—	7,53
3,05	—	—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	—	4,55	4,91	5,31	5,74	—	5,93	6,41	6,96	—	7,54	8,15
3,28	—	—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	—	4,91	5,30	5,73	6,19	—	6,41	6,93	7,52	—	8,15	8,80
3,53	2,79	—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	—	5,30	5,72	6,18	6,67	—	6,93	7,50	8,13	—	8,80	9,51
3,8	—	3,25	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	—	5,72	6,17	6,67	7,20	—	7,50	8,11	8,79	—	9,51	10,3
4,1	—	—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	—	6,19	6,68	7,21	7,79	—	8,13	8,79	9,52	—	10,3	11,1
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—
4,4	—	—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	—	6,65	7,18	7,75	8,37	—	8,76	9,46	10,2	—	11,1	12,0
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,8	—	—	—	—	—	—
4,7	—	—	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	—	7,12	7,79	8,30	8,96	—	9,39	10,1	11,0	—	11,9	12,8
5,1	—	—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	—	7,75	8,36	9,02	9,74	—	10,2	11,0	11,9	—	12,9	13,9
5,5	—	—	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	—	8,37	9,03	9,75	10,5	—	11,1	11,9	12,9	13,3	14,0	15,1
5,9	—	—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	—	8,99	9,70	10,5	11,3	—	11,9	12,8	13,9	—	15,0	16,2
6,4	—	—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	—	9,77	10,6	11,4	12,3	—	12,9	14,0	15,1	—	16,3	17,6
6,9	—	—	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	—	10,6	11,4	12,3	13,3	—	14,0	15,1	16,3	—	17,7	19,0
7,4	—	—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	—	11,3	12,6	13,3	14,2	—	15,0	16,2	17,6	—	19,0	20,4
8	—	—	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	—	12,3	13,2	14,4	15,4	—	16,3	17,6	19,0	—	20,5	22,1
8,6	—	—	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	—	13,2	14,2	15,5	16,6	—	17,6	18,9	20,5	—	22,1	23,8
9,3	—	—	—	9,83	10,58	11,4	12,4	13,3	—	14,3	15,4	16,6	17,9	—	19,0	20,5	22,2	—	24,0	25,8
10	—	—	—	—	11,4	12,3	13,3	14,3	14,8	15,4	16,6	17,9	19,3	19,8	20,5	22,1	23,9	24,5	25,8	27,8
10,8	—	—	—	—	—	—	14,4	15,5	—	16,6	17,9	19·2	20,9	—	22,2	23,9	25,9	—	27,9	30,1
11,6	—	—	—	—	—	—	15,5	16,6	—	17,9	19,3	28,2	22,4	—	23,9	25,7	27,8	—	30,0	32,3
12,5	—	—	—	—	—	—	—	17,9	18,5	19,4	20,8	3,40	24,2	24,8	25,8	27,8	30,0	30,8	32,4	34,9

b \ a	0,83	0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2,0	2,1	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20,8	22,5	24,2	26,1	—	27,9	30,0	32,4	—	35,0	37,7
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24,2	26,1	28,0	—	30,0	32,3	34,9	—	37,6	40,5
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28,0	30,2	—	32,3	34,8	37,6	—	40,5	43,7
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39,5	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32,6	—	34,8	37,5	40,5	—	43,7	47,0
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37,3	40,2	43,4	—	46,8	50,4
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	43,6	47,1	—	50,8	54,7
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49,5	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57,4	61,8
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70,3
26,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

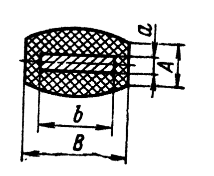
b \ a	3	3,05	3,28	3,53	3,8	4	4,1	4,4	4,7	5,0	5,1	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5
2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,05	—	8,72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,28	—	9,51	10,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,53	—	10,3	11,1	12,0	12,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

3,8	—	11,1	12,0	—	13,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,1	—	12,0	13,0	14,0	15,1	—	15,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,4	—	12,9	13,9	15,0	16,2	—	17,1	18,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,7	—	13,8	14,9	16,1	17,4	—	18,4	—	21,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,1	—	15,1	16,2	17,5	18,9	—	20,0	21,2	—	—	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	—	16,3	17,5	18,9	20,4	—	21,7	23,3	25,0	—	27,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,9	—	17,5	18,9	20,3	21,9	—	23,3	25,1	26,8	—	29,2	—	34,5	—	—	—	—	—	—	—
6,4	—	19,0	20,5	22,1	23,8	—	25,3	27,3	29,2	—	31,7	34,3	37,5	—	—	—	—	—	—	—
6,9	—	20,6	22,1	23,1	25,7	—	27,4	29,5	31,5	—	34,3	37,1	40,5	—	47,4	—	—	—	—	—
7,4	—	22,1	23,6	25,6	27,6	—	29,4	31,7	33,9	—	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	—	—	—	—	—
8	—	23,9	25,7	27,7	29,9	—	31,9	34,3	36,7	—	39,9	43,1	47,1	51,1	55,1	63,1	—	—	—	—
8,6	—	25,7	27,7	29,9	32,2	—	34,4	36,9	39,5	—	43,0	46,4	50,7	55,0	59,3	68,9	—	—	—	—
9,3	—	27,9	30,0	32,3	34,8	—	37,2	40,0	42,8	—	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	73,5	82,8	—	—	—
10	29,5	30,0	32,3	34,8	37,5	39,5	40,1	43,1	46,1	49,1	50,1	54,1	59,1	64,1	69,1	79,1	89,1	99,1	—	—
10,8	—	32,4	34,9	37,6	40,5	—	43,4	46,6	49,9	—	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	85,5	96,3	—	—	—
11,6	—	34,9	37,5	40,5	43,6	—	46,7	50,1	53,6	—	58,3	62,9	68,7	75,5	80,4	91,9	103,5	—	—	—
12,5	37,0	37,6	40,5	43,6	47,0	49,5	50,4	54,1	57,9	—	62,9	67,9	74,1	80,4	86,6	99,1	111,6	124,1	136,6	155,4
13,5	—	40,7	43,8	47,2	50,8	—	54,5	58,5	62,6	—	68,0	73,4	80,1	86,9	93,6	107,1	120,6	—	—	—
14,5	—	43,7	47,1	50,6	54,6	—	58,6	62,9	67,3	—	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	115,1	129,6	—	—	—
15,6	—	47,7	50,7	54,6	58,8	—	63,1	67,6	72,4	—	78,7	84,9	92,7	100,5	108,3	123,9	139,5	155,1	—	—
16	47,5	—	—	—	—	63,5	—	—	—	79,1	—	—	95,1	—	—	127,1	—	—	—	—
16,8	—	50,7	54,6	58,8	63,3	—	68,0	73,0	78,1	—	84,8	91,5	99,9	108,3	116,7	133,5	—	—	—	—
18	—	54,4	58,5	63,0	67,9	—	72,9	78,3	83,7	—	90,9	98,1	107,1	116,1	125,1	143,1	—	—	—	—
19,5	—	59,0	63,5	68,3	73,6	—	79,1	84,3	90,8	—	98,6	106,4	116,1	126,9	135,6	155,1	—	—	—	—
20	59,5	—	—	—	—	79,5	—	—	—	99,1	—	—	119,1	—	—	159,1	—	—	—	—
22	—	66,6	71,7	77,2	83,1	—	89,1	95,8	102,5	—	111,3	120,1	131,1	142,1	153,1	—	—	—	—	—
25	74,5	75,8	81,5	88,3	94,5	99,5	101,4	109,1	116,5	124,1	126,6	136,6	149,1	161,6	174,1	—	—	—	—	—
26,3	—	79,7	85,8	92,3	99,4	—	106,9	114,3	122,7	—	133,2	143,8	156,9	170,1	183,2	—	—	—	—	—
28	—	—	91,3	93,3	105,9	111,5	113,9	122,3	130,7	—	141,9	153,1	167,1	181,1	195,1	—	—	—	—	—
30	—	—	—	105,4	113,5	119,5	122,1	131,1	140,1	149,1	152,1	164,1	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	121,1	—	139,9	139,3	149,5	—	162,3	175,1	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	132,5	139,5	142,6	153,1	163,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Толщина изоляции обмоточных проводов, изготавливаемых по ГОСТам

Марка провода	Круглые провода при диаметрах голой меди, *мм*											Прямоугольные провода		
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,48	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45	1,50—2,10	22,6—5,20	0,83—1,95	2,1—3,8	4,1—5,5
ПБО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	—	0,14	0,175	0,23
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	—	0,27	0,33	0,44
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40
ПСД	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21—0,23	0,23	—	—	—	—
ПЭВ-1	0,025	0,025—0,3	0,03—0,04	0,04	0,04	0,04—0,05	0,05	0,06	0,07—0,08	—	—	—	—	—
ПЭВ-2	0,03	0,03—0,04	0,045	0,06	0,06	0,06—0,07	0,07—0,08	0,09	0,1—0,11	0,11—0,13	—	—	—	—
ПЭЛ, ПЭТ	0,015	0,02	0,025	0,04	0,04	0,04—0,05	0,05	0,06	0,07—0,08	0,08—0,1	0,1	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	—	—	—	—
ПЭЛКО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	—	—	—	—
ПЭЛШКО, ПЭЛШО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	—	—	—	—
ПЭТСО	—	—	—	—	—	0,20	0,20	0,22	0,22—0,24	0,24	—	—	—	—
ПЭТСОТ	—	—	—	—	—	0,16	0,16	0,18	0,20 - 0,21	0,21	—	—	—	—

Примечания: 1. Приведена двусторонняя толщина изоляции: $D - d$ — для круглого провода, $A - a$ — для прямоугольного.
2. Прочерки означают, что провода данных размеров не изготовляются.



Толщина изоляции круглых и прямоугольных обмоточных проводов, изготавливаемых по ТУ

Марка провода	Круглые провода при диаметре голой меди, *мм*									
	0,06—0,09	0,01—0,14	0,15—0,21	0,23—0,33	0,35—0,49	0,51—0,62	0,64—0,96	1,00—1,25	1,30—1,74	1,81—2,44
ПЭТВ	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,05	0,06	0,07
ПСДКТ	0,31—0,51	0,53—0,96	1,0—1,56	ПСОТ	0,62—0,81	2,1	ПЭТКСО	0,38—0,69	0,72—0,96	1,0—2,10
	0,14	0,16	0,18		0,10	0,10		0,16	0,18	0,20
ПЭТКСОТ	0,33—0,69	0,72—0,96	1,00	1,20—1,35	1,56					
	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16					
ПСДКТ-М	0,31—0,38	0,41—0,51	0,53—0,69	0,72—0,96	1,00—1,56	1,62—2,10				
	0,138	0,14	0,16	0,165	0,18	0,22				

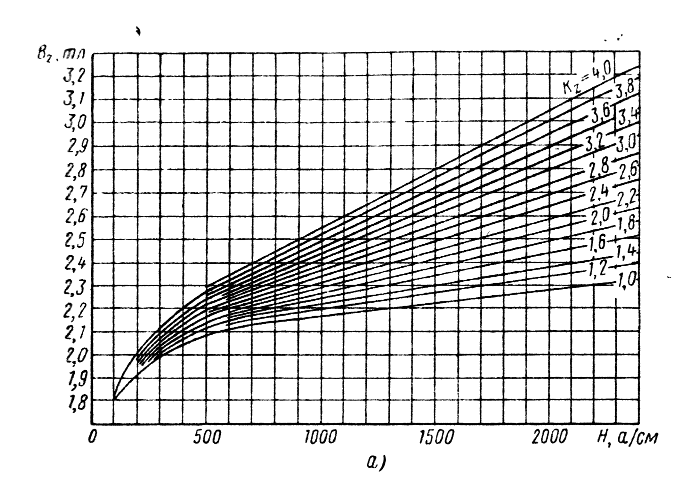
Марка провода	Прямоугольные провода при номинальных размерах, *мм*									
	0,83×3,53	0,9×2,1	0,9×2,83	0,9×3,8	1,0×3,8	1,08×3,8	1,16×3,8	1,25×2,1		0,9—4,4× ×2,1—14,5
ПЭТКСОТ	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,22	ПСДКТ-М	0,22
	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18		0,26

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Таблицы намагничивания $B=f(H)$ сталей

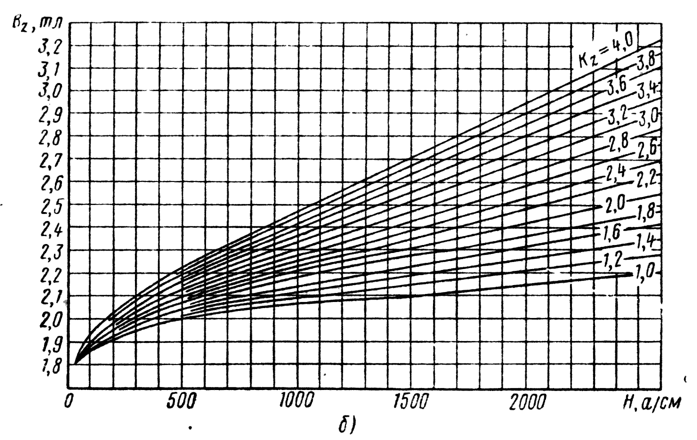
В, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
а. Листовая электротехническая сталь Э11, Э12, Э21										
0,40	1,4	1,41	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47	1,48	1,49
0,50	1,5	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,64	1,66	1,68
0,60	1,7	1,73	1,76	1,79	1,82	1,85	1,88	1,91	1,94	1,97
0,70	2,0	2,04	2,08	2,12	2,16	2,2	2,24	2,28	2,32	2,36
0,80	2,4	2,46	2,52	2,58	2,64	2,7	2,76	2,82	2,88	2,94
0,90	3,0	3,07	3,14	3,21	3,28	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63
1,00	3,7	3,81	3,92	4,03	4,14	4,25	4,36	4,47	4,58	5,69
1,10	4,8	4,93	5,06	5,19	5,32	5,45	5,58	5,71	5,84	5,97
1,20	6,1	6,31	6,52	6,73	6,94	7,15	7,36	7,57	7,78	7,99
1,30	8,2	8,58	8,96	9,34	9,72	10,1	10,48	10,86	11,24	11,62
1,40	12,0	12,7	13,4	14,1	14,8	15,5	16,2	16,9	17,6	18,3
1,50	19,0	20,3	21,6	22,9	24,2	25,5	26,8	28,1	29,4	30,7
1,60	32,0	34,6	37,2	39,8	42,4	45	47,6	50,2	52,8	55,4
1,70	58,0	62,2	66,4	70,6	74,8	79	83,2	87,4	91,6	95,8
1,80	100	108	116	124	132	140	148	156	164	172
1,90	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
2,00	280	295	310	325	340	360	390	420	450	480
2,10	500	560	620	680	740	800	880	960	1040	1120
2,20	1200	1280	1360	1440	1520	1600	1660	1745	1830	1915
2,30	2000	2080	2160	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720
2,40	2800	2890	2980	3070	3160	3250	3310	3370	3440	3500
2,50	3570	3640	3720	3790	3870	4950	4020	4090	4170	4240
б. Листовая электротехническая сталь Э31										
0,40	0,7	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79
0,50	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98
0,60	1,0	1,03	1,06	0,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,27
0,70	1,3	1,34	0,38	1,42	1,46	1,5	1,54	1,58	1,62	1,66
0,80	1,7	1,78	1,86	1,94	2,02	2,1	2,18	2,26	2,34	2,42
0,90	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,85	2,9	2,95
1,00	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
1,10	4,0	4,15	4,3	4,45	4,6	4,75	4,9	5,05	5,2	5,35
1,20	5,5	5,72	5,94	6,16	6,38	6,6	6,82	7,04	7,26	7,48
1,30	7,7	8,13	8,56	9,0	9,42	9,85	10,28	10,71	11,14	11,57
1,40	12,0	13,6	15,2	16,8	18,4	20,0	21,6	23,2	24,8	26,4
1,50	28	30,2	32,4	34,6	36,8	39	41,2	43,4	45,6	47,8
1,60	50	54	58	62	66	70	74	78	82	86
1,70	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144
1,80	150	156	162	168	174	180	194	208	222	236
1,90	250	268	286	304	322	340	378	416	454	492
2,00	530	604	678	752	826	900	985	1070	1115	1240
2,10	1325	1410	1495	1580	1665	1750	1840	1930	2020	2110
2,20	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2780	2860	2940	3020
2,30	3100	3180	3260	3340	3420	3500	3590	3680	3770	3860
2,40	3950	4040	4130	4220	4310	4400	4480	4560	4640	4720
2,50	4800	4890	4980	5070	5160	5250	5330	5410	5490	5570

B, *тл*	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
в. Листовая холоднокатаная электротехническая сталь Э310										
1,00	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	0,95	2,0	2,05	2,1	2,15
1,10	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,46	2,53	2, 6	2,67	2,73
1,20	2,8	2,89	2,98	3,07	3,16	3,25	3,34	3,43	3,52	3,61
1,30	3,7	3,83	3,96	4,09	4,22	4,35	4,48	4,61	4,74	4,87
1,40	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
1,50	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7
1,60	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1,70	20	21	22	23	24	25	28	31	34	37
1,80	40	43	46	50	54	59	65	71	78	85
1,90	92	100	112	130	155	190	225	260	300	350
2,00	400	450	500	550	600	—	—	—	—	—
г. Листовая холоднокатаная электротехническая сталь Э320										
1,00	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15
1,10	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,46	2,53	2,6	2,67	2,73
1,20	2,8	2,89	2,98	3,07	3,16	3,25	3,34	3,43	3,52	3,61
1,30	3,7	3,83	3,96	4,09	4,22	4,35	4,48	4,61	4,74	4,87
1,40	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
1,50	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7
1,60	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
1,70	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1,80	25	28	31	34	37	41	45	50	58	67
1,90	77	88	100	120	140	160	185	210	240	270
2,00	300	350	380	430	500	—	—	—	—	—
д. Листовая холоднокатаная электротехническая сталь Э330										
1,00	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15
1,10	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,46	2,53	2,6	2,67	2,73
1,20	2,8	2,87	2,94	3,01	3,08	3,15	3,22	3,29	3,36	3,43
1,30	3,5	3,63	3,76	3,89	4,02	4,15	4,28	4,41	4,54	4,67
1,40	4,8	4,94	5,08	5,22	5,36	5,5	5,64	5,78	5,92	6,06
1,50	6,2	6,36	6,52	6,68	6,84	7,0	7,16	7,32	7,48	7,64
1,60	7,8	8,02	8,24	8,46	8,68	8,9	9,12	9,34	9,56	9,78
1,70	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1,80	20	21	22	23	24	25	27	31	36	43
1,90	50	58	67	77	88	100	130	170	210	250
2,00	300	340	380	430	500	—	—	—	—	—
е. Литая сталь, толстые листы и поковки										
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72
0,10	0,8	0,88	0,96	1,04	1,12	1,2	1,28	1,36	1,44	1,52
0,20	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08	2,16	2,24	2,32
0,30	2,4	2,48	2,56	2,64	2,72	2,8	2,88	2,96	3,04	3,12
0,40	3,2	3,28	3,36	3,44	3,52	3,6	3,68	3,76	3,84	3,92
0,50	4	4,08	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,7	4,79
0,60	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,70	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,80	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,90	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,5	8,73	8,85	8,98	9,11
1,00	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,73
1,10	10,9	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,20	12,9	13,15	13,4	13,7	14	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
1,30	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,40	20,9	21,6	22,3	23	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28
1,50	28,9	29,9	31	32,1	33,2	34,3	35,6	37	38,3	39,6
1,60	41	42,5	44	45,5	47	48,5	50	51,5	53	55
1,70	85	88	91	94	97	100	105	110	116	122



Bz, тл
3,2
3,1
3,0
2,9
2,8
2,7
2,6
2,5
2,4
2,3
2,2
2,1
2,0
1,9
1,8
0
500
1000
1500
2000
H, а/см
Kz=4,0
3,8
3,6
3,4
3,2
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0

а)



Bz, тл
3,2
3,1
3,0
2,9
2,8
2,7
2,6
2,5
2,4
2,3
2,2
2,1
2,0
1,9
1,8
0
500
1000
1500
2000
H, а/см
Kz=4,0
3,8
3,6
3,4
3,2
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0

б)

Рекомендуемые параметры щеток для электрических машин общего назначения (ГОСТ 2332—63)

Наименование марок щеток	Обозначения марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, *в*	Плотность тока, *а/см²*	Окружная скорость, *м/сек*	Удельное нажатие, *н/см²*	Преимущественные области применения
Графитные	Г1	2,2	7	12		Для генераторов и электродвигателей с облегченными условиями коммутации
	Г3	1,9	10—11	25	2,0—2,5	
	БНМ	2,0	10—12	40		
Угольно-графитные	Т2, Т6	2,0	6	10	2,0—2,5	Для генераторов и электродвигателей со средними условиями коммутации
Электрографитированные	ЭГ2а	2,6	10		2,0—2,5	Для генераторов и электродвигателей со средними и затрудненными условиями коммутации
	ЭГ4	2,0	12		1,5—2,0	
	ЭГ8	2,4	10	40	2,0—4,0	
	ЭГ14	2,5	10—11		2,0—4,0	
	ЭГ71	2,2	10—12		2,0—2,5	
	ЭГ74	2,7	10—15	50	1,75—2,5	
Меднографитные	М1	1,5	15	25	1,5—2,0	Для низковольтных генераторов
	М3	1,8	12	20	1,5—2,0	
	М6	1,5	15	25	1,5—2,0	
	М20	1,4	12	20	1,5—2,0	
	МГ	0,2	20	20	1,8—2,3	
	МГ2	0,5	20	20	1,8—2,3	
	МГ4	1,1	15	20	2,0—2,5	
	МГ64	0,5	20—25	25	1,5—2,0	
	МГС5	2,0	15	35	2,0—2,5	

Примечания: 1. Коэффициент трения для всех марок щеток о коллектор принимается равным 0,25.

2. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и скоростях вращения выше 1500 *об/мин* удельное нажатие на щетку может быть повышено до 5 *н/см²*.

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Основные параметры щеток для машин летательных аппаратов

Марки щеток	$j_щ$, $а/см^2$	$p_щ$, $н/см^2$	$v_к$, м/сек	$\Delta U_щ$, в	ρ, $\frac{ом \cdot мм^2}{м}$	$\mu_щ$	Износ за 50 ч, мм	Твердость по Шору
МС-6	15	2,5	15	2	3—15	0,25	0,25	
МГС-7	27	5,0	55	1,6—2,4	3—10	0,2	0,35	14—25
МГС-8	28	6,0	55	2,0—2,8	6—16	0,2	0,5	11—21
МГС-12	—	—	—	1	5	0,16	0,5	15—25
А-8	15	2,5	15	0,7—1,7	2,5—10,5	0,2	0,2	26—35
А-12	24	2,5	15	1,6	2,5—10,5	0,17	0,25	—
А-16	15	2,5	40	2,3	24—40	0,25	0,15	40—60
А-29	24	2,5	40	3,5	10—17	0,22	0,2	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Размеры щеток для электрических машин, *мм* (ГОСТ 12232—66)

$b_щ$	1,0	1,6						2,0				
$l_щ$	1,6	2,0				2,5		2,5		3,2		4,0
h	6,3	5,0	6,3	8,0	10,0	6,3	8,0	8,0	10,0	6,3	8,0	10,0

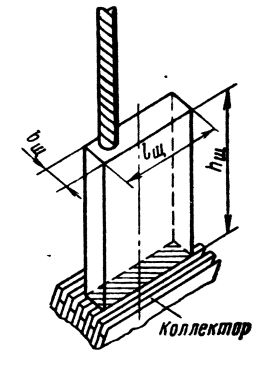
$b_щ$	2,5									3,2								
$l_щ$	3,2		4,0		5,0		6,3		10,0	4,0					5,0		6,3	
h	8,0	10,0	8,0	10,0	10,0	12,5	12,5	16,0	32	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	12,5	16,0	10,0	12,5

$b_щ$	4,0				5,0								6,3		
$l_щ$	5,0	6,3		10,0	6,3		8,0			10			10		
h	12,8	12,5	16,0	16,0	12,5	16,0	16,0	20,0	25,0	16,0	20,0	25,0	20,0	25,0	32,0

$b_щ$	6,3			8,0								
$l_щ$	12,5			10,0			12,5		16,0		20,0	
h	20,0	25,0	32,0	20,0	25,0	32,0	25,0	32,0	25,0	32,0	25,0	32,0

$b_щ$	10,0							12,5								
$l_щ$	12,5		25,0			40,0		16,0		20,0		32		40		
h	25,0	32,0	32,0	40,0	50,0	40,0	50,0	25,0	32,0	32,0	40,0	32,0	50,0	40,0	50,0	64,0

$b_щ$			16,0													
$l_щ$	50		20,0			25,0			32,0			40,0			50,0	
h	50,0	64,0	32,0	40,0	50,0	32,0	40,0	50,0	32,0	40,0	50,0	40,0	50,0	64,0	50,0	64,0



Литература

1. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат, 1959.
2. Аскерко В. С. и др. Авиационные электрические машины. Изд. ВВИА им. Жуковского, 1959.
3. Бертинов А. И., Ризник Г. А. Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока. Оборонгиз, 1958.
4. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. Госэнергоиздат, 1961.
5. Гурин Я. С., Курочкин М. Н. Проектирование машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.
6. Ермолин Н. П. Расчет маломощных коллекторных машин. Госэнергоиздат, 1955.
7. Ермолин Н. П. Электрические машины малой мощности. Изд-во «Высшая школа», 1967.
8. Зимин В. И. и др. Обмотки электрических машин. Госэнергоиздат, 1954.
9. Костенко М. П. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1949.
10. Костенко М. П., Пиотровский А. М. Электрические машины. Ч. I. Госэнергоиздат, 1957.
11. Акимов В. Н. и др. Основы электрооборудования самолетов и автомашин. Госэнергоиздат, 1955.
12. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. III, изд-во «Энергия», 1968.
13. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Гостехиздат УССР, 1952.
14. Сергеев П. С. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1955.
15. Сергеев П. С. и др. Проектирование электрических машин. Изд-во «Энергия», 1969.
16. Толвинский В. А. Электрические машины постоянного тока. Госэнергоиздат, 1956.
17. Шенфер К. И. Динамомашины и двигатели постоянного тока. ГОНТИ, 1937.

Оглавление

Морозов Алексей Георгиевич

Расчет электрических машин постоянного тока

Научный редактор Н. З. Мастяев
Редактор издательства Л. А. Романова
Обложка художника Ю. В. Львова.
Художественный редактор Т. М. Скворцова
Техн. редактор Э. М. Чижевский
Корректор В. И. Мишанина

Т-17672. Сдано в набор 3/VI—71 г. Подп. к печ. 13/XII—71 г.
Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Объем 14 п. л. Уч.-изд. л. 11.74
Изд. № ЭР-125 Тираж 40 000 экз. Цена 51 коп. Заказ 3280
План выпуска литературы для вузов и техникумов издательства «Высшая школа» на 1972 г.
Позиция № 101, Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа»
Московская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Хохловский пер., 7.